

تکنولوژی نوین آزمون غیرمخرب با استفاده از امواج تراهرتز

فرزاد مرادیان نژاد^{۱*}، حمیدرضا زنگنه^۲، امید پناهی^۳، محسن گلزارشهری^۱، سید محمدعلی مرتضوی^۱، علی

سوری^۱

^۱ سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت سوخت راکتورهای هسته‌ای، صندوق پستی: ۸۱۴۶۵-۱۹۵۷

^۲ دانشجوی دکتری، فیزیک، دانشگاه کاشان

^۳ دانشیار، فیزیک، دانشگاه کاشان

^۴ کارشناسی ارشد، فوتونیک، دانشگاه شهید بهشتی

* moradiannejad@grad.kashanu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش امکان ارزیابی مواد به صورت غیرمخرب با استفاده از امواج تراهرتز بررسی شد. برای این منظور نتایج حاصل از تعیین ابعاد عیوب مشخص روی نمونه‌های الگوی ساخته شده از جنس آلومینیوم، پلکسی گلاس و سرامیک دی اکسید زیرکونیوم با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های ابعادی با روش‌هایی نظیر ماشین اندازه‌گیری مختصات، میکروایکس و ماشین اندازه‌گیری مرئی مقایسه گردید. جهت انجام پژوهش، بسته به ماهیت نمونه و اطلاعات مورد نیاز از دو چیدمان سیستم تصویربرداری تراهرتز عبوری و انعکاسی بر پایه‌ی سیستم طیف سنجی حوزه‌ی زمانی تراهرتز استفاده شد که در آن تولید و آشکارسازی پالسهای امواج تراهرتز با استفاده از یک لیزر فمتوثانیه انجام می‌شود. نتایج نشان داد آزمون غیرمخرب تراهرتز در تشخیص عیوب (عیوب سطحی بسیار کم عمق و عیوب مخفی در بافت نمونه) و اندازه‌گیری‌ها برتر از برخی روش‌های متداول ذکر شده است. در مجموع بسته به انتظار از آزمون و نوع عملکرد آن، روش تصویربرداری با امواج تراهرتز را می‌توان جزو آزمون‌های غیرمخرب قابل رقابت با روش‌های متداول دانست.

واژگان کلیدی: آزمون غیرمخرب، امواج تراهرتز، نمونه‌ی الگو، درونیابی تصویر

۱- مقدمه

پزشکی، انتقال اطلاعات، حوزه نانو تکنولوژی به اثبات رسیده است [۱-۳].

امواج تراهرتز به صورت پیوسته و پالسی توسط تکنیک‌های مختلف تولید می‌شود. یکی از روش‌های تولید امواج تراهرتز پالسی استفاده از مواد فوتورسانا در قالب گسیلنده و آشکارساز امواج تراهرتز می‌باشد. گسیلنده‌ها و آشکارسازهای تراهرتز در این روش بر پایه‌ی آنتن‌های نور رسانشی^۲ (PCA) استوارند. آنتن نور رسانشی یک سوییج الکتریکی است که از خاصیت افزایش رسانایی الکتریکی نیمرساناها و نارساناها هنگامیکه تحت نور قرار می‌گیرند، استفاده می‌کند. برای گسیل و آشکارسازی تابش تراهرتز، عمل سوییج در آنتن نور رسانشی باید در بازه زمانی زیر پیکوثانیه رخ دهد [۴].

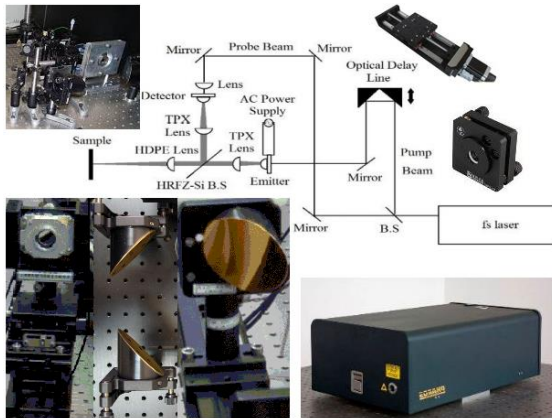
زمان سوییج روشن، تابع طول پالس لیزر بوده و زمان سوییج خاموش، عمدتاً توسط عمر حامل‌های برانگیخته شده

امروزه در صنایع مختلف، برای بازرسی و ارزیابی غیرمخرب قطعات و تجهیزات، از آزمون‌های غیرمخرب مختلفی نظیر آلتراسونیک، پرتونگاری، ارتعاش‌سنجی، نشتیابی روش‌های متفاوتی تعریف، تجاری‌سازی و استفاده می‌شود. با پیشرفت علم و دستیابی به فناوری‌های جدید، آزمون غیرمخرب با استفاده از امواج تراهرتز توسعه یافته است. امواج تراهرتز^۱ جزو تابش‌های الکترومغناطیسی است که در بازه فرکانسی 10^{11} - 10^{13} Hz بین ناحیه طیفی فرورسرخ و ماکروویو قرار می‌گیرد و به دسته‌های ریز باند $1-10$ THz، پهن باند $10-100$ THz و فوق پهن باند $100-300$ THz تقسیم می‌شود. با توجه به خواص امواج تراهرتز از قبیل غیر یونسازی، قابلیت نفوذ در مواد غیر قطبی و خشک و امکان دریافت اطلاعات طیف سنجی از آن، قابلیت این پرتو در زمینه‌های گوناگون نظیر کاربردهای صنعتی،

¹ Terahertz waves

² Photoconductive antenna

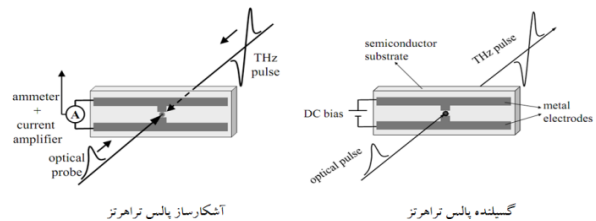
تراهرتز با استفاده از یک لیزر فمتوثانیه در شکل (۲) آورده شده است [۵].



شکل ۲- شماتیک سیستم طیف سنجی حوزه زمانی تراهرتز به همراه تصاویر تجهیزات آن

سیستم طیف سنجی به دو نوع عبوری و انعکاسی تقسیم می‌گردد. بسته به ماهیت نمونه و اطلاعات مورد نیاز یکی از این دو نوع سیستم طیف سنجی در انجام آزمون غیرمخرب بکار می‌رود. امواج تراهرتز با توان معمولی (کمتر از ۱ وات) در بسیاری از مواد غیررسانای خشک و غیر قطبی همچون پلاستیک، پلیمرهای پایه آلی، کامپوزیت سامانه‌های فضایی، سرامیک، مصالح ساختمانی و مواردی مشابه نفوذ می‌کند، به همین دلیل عیوب عمقی در بافت آنها را می‌توان با استفاده از آزمون غیرمخرب تراهرتز به شیوه عبوری با حد تشخیص بالا تعیین نمود [۶]. اینگونه امواج توسط فلزات و مواد رسانا بصورت کامل منعکس می‌شود که برای تشخیص عیوب اینگونه مواد بایستی از آزمون غیرمخرب تراهرتز به شیوه انعکاسی استفاده شود. همچنین این امواج توسط آب و مواد قطبی بصورت کامل جذب می‌شود که از این خاصیت برای کنترل کیفی پوشش سطوح با دقت بسیار بالا استفاده می‌شود. در انجام آزمون غیرمخرب با استفاده از امواج تراهرتز با بررسی تغییر شکل، تغییر محل و یا قطع کامل سیگنال نمونه^۳ در مقایسه با سیگنال مرجع^۴ قابل انجام است [۷]. در شکل (۳) شماتیکی از نحوه تشخیص نقص در یک نمونه به همراه یک شکل از مقایسه سیگنال مرجع (مربوط به قسمتی از بافت که فاقد عیب است) با سیگنال نمونه (مربوط به قسمتی از بافت که حاوی عیب است) برای

با نور در زیر لایه نیمرسانای آنتن تعیین می‌شود. در این بین بلور گالیوم آرسناید رشد یافته در دمای پایین^۱ (LT-GaAs) بین ۱۸۰ تا ۲۴۰ درجه سانتیگراد، طول عمر حامل پیکوثانیه دارد. گسیلنده تراهرتز شامل دو الکتروود فلزی پوشش شده روی بلور نیمرسانای گالیوم آرسناید است و همواره یک بایاس مستقیم بین الکتروودهای آن اعمال می‌شود. سازوکار اساسی آشکارسازی میدان تراهرتز در یک آنتن نور رسانشی تقریباً مشابه گسیل تراهرتز در یک گسیلنده آنتن نور رسانشی است با این تفاوت که بجای اعمال بایاس مستقیم، جریان نور القایی در آنتن اندازه‌گیری می‌شود. جریان نور القایی با دامنه میدان تابش تراهرتز متمرکز روی گاف نور رسانشی متناسب است. با اندازه‌گیری جریان به صورت تابعی از تاخیر زمانی بین پالس تراهرتز و پالس لیزری پروب، شکل زمانی پالس تراهرتز بدست می‌آید. نمایی از گسیلنده و آشکارساز پالس تراهرتز در شکل (۱) نشان داده شده است [۴].



شکل ۱- نمای گسیلنده و آشکارساز پالس تراهرتز [۴]

با استفاده از یک لیزر فمتوثانیه می‌توان یک سیستم طیف سنجی حوزه زمانی تراهرتز^۲ (TDS) جهت تولید و آشکارسازی پالسهای تراهرتز را طراحی و راه اندازی نمود. در این سیستم باریکه اپتیکی به دو بخش شکافته می‌شود، یکی تحت عنوان پالس پمپ اپتیکی با گسیلنده برخورد کرده و پالس تراهرتز تولید می‌کند [۵]. این پالس پس از طی مسیری روی آشکارساز متمرکز می‌گردد. بخش دیگر باریکه اپتیکی تحت عنوان پالس پروب برای ایجاد تاخیر زمانی نسبی از یک جایجاگر می‌گذرد. اثرات القایی تراهرتز توسط پالسهای پروب در آشکارساز اندازه‌گیری می‌شود و در نهایت شکل زمانی پالس تراهرتز بدست می‌آید. شماتیک یک پیکربندی نوعی از سیستم طیف سنجی حوزه زمانی

¹ Low Temperature Gallium Arsenide crystal

² THz time-domain spectroscopy

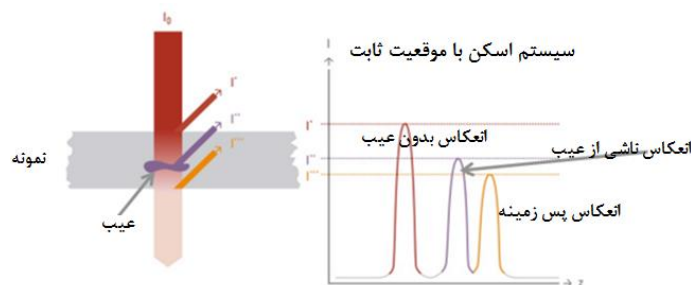
³ Sample Signal

⁴ Reference Signal

پایه و اساس متفاوت از یکدیگر هستند اندازه گیری شود [۱۰]. هرچقدر روشهای مورد استفاده برای اندازه گیری تفاوت بنیادی نسبت به یکدیگر داشته باشند، نتایج ارزیابی آماری بین روشها از اعتبار بالاتری برخوردار خواهد بود. همچنین علاوه بر مقایسه‌ی بین روشهای اندازه گیری، لازم است بافت نمونه های الگو با عیوب مصنوعی ایجاد شده در آنها نیز تغییر کند تا عملکرد روش نسبت به تغییر بافت نمونه نیز بررسی گردد. نمونه های مورد نظر جهت بررسی آزمون غیرمخرب با استفاده از امواج تراهرتز از جنس آلومینیوم، پلکسی گلاس شفاف و مات و نیز سرامیک دی اکسید زیرکونیوم^۲ انتخاب گردید که هر یک از نمونه‌ها بسته به ماهیت آن ساخته و آماده سازی شد.

۳- نتایج و بحث

نمونه‌ی الگوی اول از جنس آلایژ آلومینیوم با گرید ۶۰۶۱ با ابعاد مشخص تهیه و در آن سه عدد عیب مصنوعی با مقطع مربع و مستطیل با ابعاد و عمق کاملا مشخص بوسیله‌ی دستگاه میکرواسپارک ایجاد گردید و پس از آن عملیات صیقل کاری و تمیزکاری روی سطح آن انجام شد.



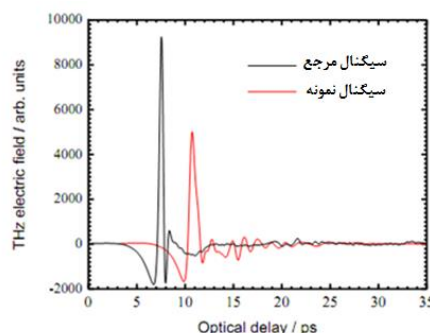
شکل ۳- نحوه‌ی تشخیص عیب در یک نمونه از مقایسه‌ی سیگنالهای مرجع و نمونه برای یک بافت خاص [۸]

نمونه‌ی الگوی دوم از دو جنس پلکسی گلس شفاف و مات با ابعاد مشخص تهیه و در آن شش عدد عیب مصنوعی به شکل استوانه ای با ابعاد و عمق کاملا مشخص بوسیله‌ی دستگاه میکروتراش مکانیکی روی یکی از سطوح ایجاد گردید. تمامی سوراخها پس از ایجاد شدن کاملا تمیز و از براده ها پاکسازی شد. سپس سطح دوم از همان جنس روی سطح حاوی عیوب با مایع مخصوص همجوش گردید که عیوب بین دو سطح پلکسی گلس محبوس شد. نمونه‌ی

یک بافت خاص قابل مشاهده است [۸]. همانگونه که آزمون غیرمخرب تراهرتز در فناوریهای روز دنیا به عنوان یک تکنیک راهگشا معرفی شده است [۹]، در این تحقیق سعی شده است که این روش به عنوان روشی نو در گروه آزمون‌های غیرمخرب تشریح گردد.

۲- روش تحقیق

در آزمایشگاه با استفاده از لیزر فمتوثانیه با توان ۱۰ نانوژول سیستم طیف سنجی حوزه زمانی تراهرتز با تولید پالس با پهنای پیک در نصف ارتفاع^۱ (FWHM) معادل ۱ پیکوثانیه طراحی و راه اندازی شده است. انجام آزمون غیرمخرب تراهرتز توسط این سیستم و در نتیجه تفسیر نتایج ناشی از آن مستلزم بدست آوردن شکل سیگنالهای مرجع و نمونه برای هر بافت خاص و مقایسه آنها با یکدیگر است. در انجام این کار بدنبال انجام آزمون غیرمخرب تراهرتز با استفاده از این سیستم بر روی نمونه‌ها با بافتهای متفاوت و مقایسه نتایج آن با نتایج سایر روشهای مرسوم در صنعت هستیم که با تحلیل آماری نتایج بدست آمده می-توان صحت فناوری پیشرفته مذکور را اثبات و جهت رفع



نیاز صنایع کشور به آن تکیه کرد.

به منظور بررسی صحت عملکرد یک روش اندازه گیری کمی و یا کیفی لازم است این روش با روشهای دیگر اثبات شده و رایج مقایسه و از لحاظ آماری تایید گردد. بنابر این جهت اثبات صحت انجام آزمون غیرمخرب با استفاده از امواج تراهرتز لازم است این روش با سایر روشهای رایج مقایسه گردد. در این راستا توصیه شده نمونه ای بصورت الگوی استاندارد تهیه و با استفاده از روشهای انتخابی که از لحاظ

¹ Full Width in Half Maximum

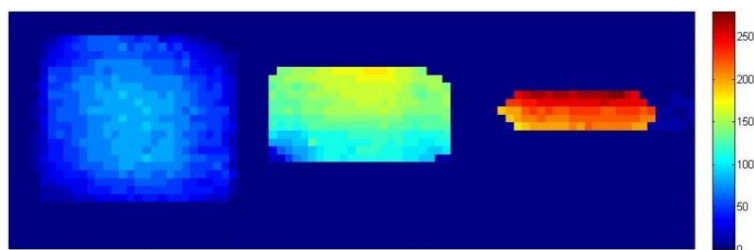
² ZrO₂

شده درون سیستم طیف سنجی حوزه زمانی تراهرتز موجود در آزمایشگاه قرار داده شد و نتایج بدست آمده از اندازه گیریها با استفاده از این سیستم با سایر روشها مقایسه گردید.

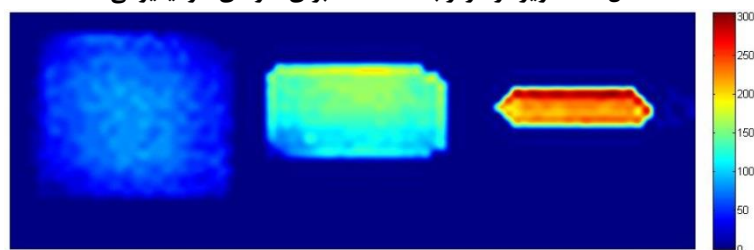
تفکیک پذیری تصویر با گام اسکن نمونه رابطه‌ی مستقیم دارد، هرچه گام اسکن کوچکتر باشد ابعاد پیکسل تصویر کوچکتر و در نتیجه تفکیک پذیری آن بالاتر است. از طرفی اسکن نمونه با گام کوچک زمان انجام آن را به صورت نمایی افزایش می‌دهد. در اینگونه موارد بایستی نسبت زمان انجام آزمون و دقت مورد انتظار از آن را بهینه‌سازی کرد. کوچکترین گام اسکن قابل انجام برای سیستم تصویربرداری تراهرتز ۰/۱ میلی‌متر است که برای سطوح بزرگ به دلیل زمان بسیار زیاد انجام آن و در نتیجه آسیب دیدن تجهیزات امکان‌پذیر نیست. بهینه گام اسکن نسبت به زمان انجام آزمون برای سطح نمونه‌ی آلومینیومی ۰/۵ میلی‌متر برآورد شد که در ادامه اسکن نمونه‌ی آلومینیومی با گام ۰/۵ میلی‌متر در راستای حرکت افقی و همچنین ۰/۵ میلی‌متر در راستای حرکت عمودی انجام شد. با توجه به بازتاب امواج تراهرتز و اختلاف مسافت طی شده توسط آن از آنتن تا آشکارساز برای هر یک از نقاط اسکن شده‌ی نمونه می‌توان موقعیت و عمق هر یک از عیوب موجود روی سطح نمونه را تصویر کرد. همانگونه که ذکر شد، دقت تصاویر بدست آمده متناسب با گام اسکن نمونه است که دقت روش در اندازه‌گیری ابعاد در سطح تقریباً معادل یک پیکسل تصویر بدست آمده است. تصویر تراهرتز بدست آمده برای نمونه آلومینیومی در شکل (۴) آورده شده است.

الگوی سوم از جنس سرامیک به روش متالورژی پودر تهیه گردید. در این روش مقدار مشخصی (حدود ۱۵ الی ۲۰ گرم) از گردید فوق خالص پودر دی‌اکسید زیرکونیوم با مقدار اندکی روان کننده مخلوط و درون قالب با مقطع مستطیلی ریخته شد که پس از اعمال فشار هیدرولیکی مناسب قطعه خام تولید گردید. سپس قطعه خام داخل کوره قرار گرفت و در دمای بین ۱۲۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه سانتیگراد سینتر و به سرامیک مقاوم تبدیل شد. در اینجا چهار نوع نمونه‌ی سرامیکی شامل: نمونه کاملاً سالم و بدون عیب به عنوان نمونه مرجع، نمونه با ترکهای میکرونی سطحی، نمونه با ترکهای میکرونی عمیق و نمونه با عیب لایه ای شده (دوسطحی با فاصله و سه سطحی بدون فاصله) با تغییر ناگهانی دمای سینترینگ، اعمال چند مرحله ای فشار و تزریق پودر در مراحل ناپیوسته به قالب با عیوب دلخواه تهیه گردید.

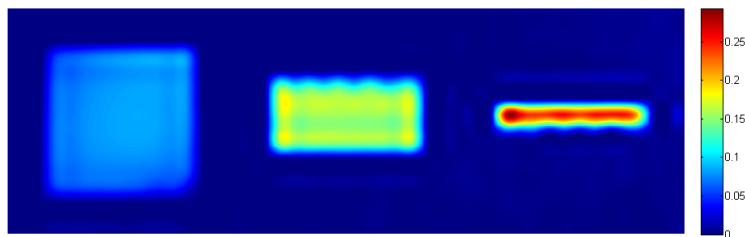
در انتخاب بافتهای نمونه برای الگوسازی به اختلاف خصوصیات ذاتی نمونه ها و تاثیر آنها بر امواج تراهرتز دقت شد. نمونه‌ی آلومینیومی، امواج را تا ۹۸ درصد بازتابانده و عیوب سطحی در آن بررسی گردید در حالی که نمونه های پلکسی گلس نسبت به تابش تراهرتز شفاف بوده و در آنها بنابر تغییر ضریب شکست، عیوب عمقی شناسایی شد. شایان ذکر است امواج تراهرتز از نمونه های سرامیکی عبور می کند اما ضریب شکست آنها نسبت به نمونه‌های پلکسی گلس بزرگتر است که بزرگی عدد به نوع سرامیک و میزان تراکم آن بستگی دارد که عیوب سطحی و عمقی در آنها قابل بررسی بود. در ادامه‌ی کار نمونه های الگوی تشریح



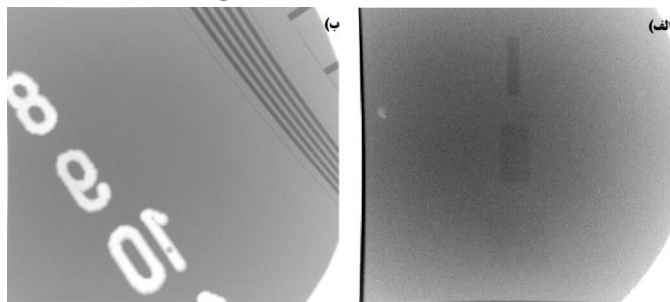
شکل ۴- تصویر تراهرتز بدست آمده برای نمونه‌ی آلومینیومی



شکل ۵- تصویر هموار شده تراهرتز بدست آمده برای نمونه‌ی آلومینیومی با استفاده از نرم افزار متلب



شکل ۶- تصویر هموار شده برای نمونه‌ی آلومینیومی بدست آمده از CMM



شکل ۷- (الف) تصویر نمونه‌ی الگوی آلومینیومی و (ب) خطکش کالیبراسیون با استفاده از دستگاه میکروایکس

بصورت رنگ مطابق نوار رنگی راهنما اختصاص داده شد و پس از درون یابی شکل (۶) بدست آمد.

نمونه‌ی آلومینیومی نیز توسط دستگاه میکروایکس که جزو روشهای اندازه گیری غیر تماسی بوده تصویر برداری شد. تصویر نمونه و خطکش کالیبراسیون دستگاه جهت مقیاس سنجی با استفاده از دستگاه میکروایکس ۵۰ میلی-آمپر با بزرگنمایی ۴۰ برابر و کنتراست ۱ به ۵۰۰۰۰ برای ۲۵۶ پیکسل در میلیمتر مربع تهیه شد و در شکل (۷) آمده است که با استفاده از آن ابعاد طولی عیوب اندازه گیری گردید. نتایج حاصل از روشهای اندازه‌گیری ابعادی انجام شده بر روی نمونه‌ی الگوی آلومینیومی جهت مقایسه با یکدیگر در جدول (۱) آورده شد.

نمونه‌ی الگوی پلکسی گلس پس از محاسبه‌ی مسیر اپتیکی با گام ۱ میلیمتر در راستای حرکت افقی و همچنین ۱ میلیمتر در راستای حرکت عمودی اسکن گردید. با توجه به عبور امواج تراهرتز و اختلاف مسافت طی شده توسط آن از آنتن تا آشکارساز برای هر یک از نقاط اسکن شده‌ی نمونه و همچنین تغییر ضریب شکست در داخل عیوب (هوا با ضریب شکست تقریبی ۱ نسبت به ضریب شکست پلکسی گلس با ضریب شکست تقریبی ۱/۵) موقعیت و عمق هر یک از عیوب موجود در عمق نمونه تصویر گردید. تصویر تراهرتز بدست آمده برای عیب ایجاد شده به قطر ۱۰

در شکل (۴) قسمت بدون عیب نمونه سطح صفر لحاظ شده و نوار رنگی راهنمای موجود در کنار تصویر میزان عمق هر عیب و چگونگی عدم یکنواختی داخل هر یک از عیوب را نشان می‌دهد. روشی که در پردازش تصویر برای هموار کردن لبه‌ی پیکسل‌های تصاویر رایج است درون‌یابی^۱ تصویر است تا جایی که لبه‌های پیکسلی تصویر استقلال خود را حفظ نماید و تغییر از یک پیکسل به پیکسلهای مجاور با همواری مناسب و قابل تشخیص طی شود. در روش درون‌یابی یک پیکسل مستقل بصورت دیجیتالی به 2^n پیکسل تبدیل می‌شود. بعنوان مثال اگر درون‌یابی با درجه‌ی ۴ برای یک تصویر 32×32 پیکسلی صورت پذیرد، تعداد کل پیکسلهای تصویر از ۱۰۶۴ به ۱۶۳۸۴ افزایش می‌یابد و هموارسازی لبه‌ی هر پیکسل بخوبی انجام می‌شود. در این خصوص تصویر مندرج در شکل (۴) با استفاده از نرم افزار توانمند متلب^۲ درون‌یابی درجه‌ی ۲۰ بین پیکسلهای تصویر انجام شد که تصویر هموار شده در شکل (۵) آورده شده است.

سطح نمونه‌ی آلومینیومی توسط ماشین اندازه‌گیری مختصات^۳ (CMM) با گام ۰/۵ میلیمتر در امتداد افق و ۰/۵ میلیمتر در امتداد عمود اسکن گردید که عمق عیوب نمونه با دقت ۱ میکرومتر اندازه گیری شد. بنابر این هر مختصات در راستای افق و عمود به یک پیکسل و عمق آن

¹ Interpolate

² MATLAB

³ Coordinate Measuring Machine

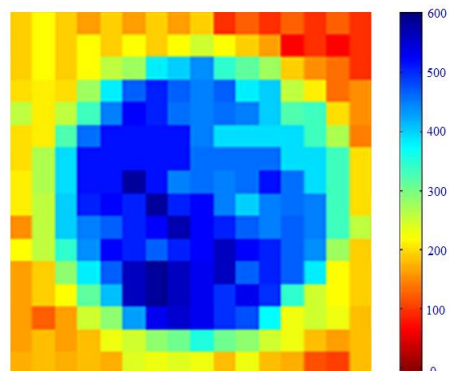
با توجه به عبور امواج تراهرتز و اختلاف مسافت طی شده توسط آن از آنتن تا آشکارساز برای هر یک از نقاط اسکن شده‌ی نمونه و همچنین تغییر ضریب شکست در عبور از لایه های مختلف و همچنین ترکهای سطحی و عمقی (هوا) با ضریب شکست تقریبی ۱ نسبت به ضریب شکست سرامیک با ضریب شکست تقریبی (۲/۵) موقعیت و میزان ترک یا لایه شدن هر یک از نمونه ها را تشخیص داد. تصویر تراهرتز بدست آمده در مقایسه با تصویر گرفته شده با استفاده از ماشین اندازه گیری مرئی^۱ (VMM) با لنز بزرگنمایی ۴/۵ و کنتراست ۱ به ۵۰۰۰۰ در شکل (۹) آورده شده است.

نتایج حاصل از این تصاویر بصورت کیفی و نیمه کمی در خصوص تشخیص و مکان عیوب با یکدیگر مقایسه شد که نتایج با یکدیگر سازگار بود.



شکل ۹- تصویر تراهرتز (بالایی) و VMM (پایینی) برای نمونه‌ی سرامیکی لایه‌ای شده

میلیمتر و عمق ۶۰۰ میکرومتر روی نمونه‌ی پلکسی گلس در شکل (۸) آورده شده که با استفاده از نرم افزار متلب درونیایی درجه ۲۰ شده است.



شکل ۸- تصویر تراهرتز بدست آمده برای عیب با قطر ۱۰ میلیمتر روی نمونه‌ی پلکسی گلس

عمق عیوب مصنوعی ایجاد شده روی سطح داخلی پلکسی گلس قبل از همجوش کردن سطح رویی آن توسط کولیس و ساعت اندازه گیری با دقت ده و یک میکرومتر اندازه گیری شد. برای هر یک از عیوب، قطر بیشینه و میانگین قطر با تغییر موقعیت لبه‌ی کولیس و نیز عمق نواحی داخلی عیوب با تغییر موقعیت نوک پروب ساعت قرائت و ثبت گردید که بصورت بیشینه و میانگین برای هر عیب در جدول (۲) آورده شده است.

اسکن نمونه‌ی الگوی سرامیکی پس از محاسبه‌ی مسیر اپتیکی با گام ۰/۵ میلیمتر در راستای حرکت افقی و همچنین ۰/۵ میلیمتر در راستای حرکت عمودی انجام شد.

جدول (۱) نتایج اندازه گیری‌ها به روشهای مختلف بر روی نمونه‌ی الگوی آلومینیومی

روشنی اندازه گیری	عیب کوچک				عیب متوسط				عیب بزرگ			
	حداکثر عمق (μm)	میانگین عمق (μm)	ضلع عمودی (mm)	ضلع افقی (mm)	حداکثر عمق (μm)	میانگین عمق (μm)	ضلع عمودی (mm)	ضلع افقی (mm)	حداکثر عمق (μm)	میانگین عمق (μm)	ضلع عمودی (mm)	ضلع افقی (mm)
Terahertz	۲۷۰	۲۵۵	۲	۹/۵	۱۷۵	۱۶۶	۵	۹/۵	۹۲	۸۷	۹/۵	۹/۵
CMM	۲۶۴	۲۴۸	۲	۹/۵	۱۷۰	۱۶۵	۵	۹/۵	۹۱	۸۵	۹/۵	۹/۵
Contour	۲۶۵	۲۵۰	۲/۱۲	۹/۹۷	۱۷۳	۱۶۸	۵/۱۷	۹/۹۲	۸۶	۸۳	۹/۹۷	۹/۹۸
Micro X	-	-	۲/۱	۹/۸	-	-	۵/۱	۹/۸	-	-	۹/۸	۹/۸
VMM	-	-	۲/۰۹	۹/۹۷	-	-	۵/۱۴	۹/۹۳	-	-	۹/۹۶	۹/۹۸

^۱ Visible Measuring Machine

جدول (۲) مقایسه‌ی نتایج اندازه‌گیری قطر و عمق عیوب نمونه‌ی پلکسی‌گلس با تراهرتز، کولیس و ساعت

میانگین عمق (mm)		بیشینه عمق (mm)		میانگین قطر (mm)		بیشینه قطر (mm)		مشخصات عیوب	
								عمق اسمی (mm)	قطر اسمی (mm)
ساعت	تراهرتز	ساعت	تراهرتز	کولیس	تراهرتز	کولیس	تراهرتز		
۵/۵۱	۵/۴۲	۵/۶۸۲	۵/۶۳۵	۵/۰۹	۵/۳۳	۵/۱۵	۵/۵	۰/۶	۵
۴/۹۳	۴/۷۴	۴/۹۵۷	۴/۹۴۵	۶/۰۷	۶/۲۷	۶/۱۲	۶/۵	۰/۵	۶
۳/۶۴	۳/۵۱	۳/۷۸۳	۳/۷۲۰	۶/۹۶	۷/۲۵	۷/۰۸	۷/۵	۰/۴	۷
۳/۵۲	۳/۴۳	۳/۸۶۴	۳/۸۵۵	۸/۱۰	۸/۲۶	۸/۱۹	۸/۵	۰/۴	۸
۴/۷۷	۴/۷۵	۴/۹۲۹	۴/۹۶۵	۹/۱۴	۹/۱۹	۹/۲۱	۹/۵	۰/۵	۹
۵/۹۶	۵/۷۸	۶/۱۶۴	۶/۰۸۵	۱۰/۰۲	۱۰/۱۵	۱۰/۱۱	۱۰/۵	۰/۶	۱۰

۴- نتیجه‌گیری

می‌شود. از نتایج مندرج در جدول (۲) قابل برداشت است که بیشینه قطر بدست آمده از روش تراهرتز همواره ۰/۵ میلیمتر بزرگتر از مقدار اسمی آن است که نشان می‌دهد به اندازه‌ی یک پیکسل در تشخیص لبه‌ی منحنی شکل خطا دارد که با میانگین‌گیری این خطا به محدوده‌ی ۰/۱ تا ۰/۳ میلیمتر کاهش می‌یابد که هرچقدر قطر عیب بزرگتر می‌شود دلیل جاگرفتن لبه‌ی عیوب در تعداد پیکسل بیشتر در تصاویر تراهرتز خطای میانگین اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. در اندازه‌گیری عمق با توجه به دقت ۵ میکرونی روش تراهرتز و دقت ۱ میکرونی ساعت اندازه‌گیری میانگین نتایج دو روش خطایی در محدوده‌ی ۰/۱ تا ۰/۲ میلیمتر دارد که مقدار قابل قبولی برای تشخیص و ابعاد سنجی عیوب مخفی در جنس پلکسی‌گلس با روش تراهرتز می‌باشد.

نتایج حاصل از انجام آزمون غیرمخرب تراهرتز بر روی نمونه‌ی الگوی سرامیکی با VMM مقایسه گردید که در این قسمت اندازه‌گیری‌های ابعادی مورد نظر نبوده است. تصاویر بدست آمده از دو روش بصورت کیفی و نیمه کمی در خصوص تشخیص و مکان عیوب با یکدیگر مقایسه شد، و با هر دو روش عیب لایه‌ای بودن نمونه و مکان آن تشخیص داده شد با این تفاوت که اگر در VMM زاویه‌ی دید از روبرو به زاویه‌ی دید از کنار تغییر کند دیگر عیب قابل تشخیص نبوده ولی در روش تراهرتز با قابلیت عبور پرتو از سرامیک در این شرایط این عیب قابل تشخیص است.

در نهایت از مقایسه‌ی روش تراهرتز با روشهای مرسوم اندازه‌گیری و سنجش ابعادی بر روی نمونه‌ها با بافتهای کاملاً متفاوت می‌توان نتیجه گرفت این روش برای تشخیص عیوب ظاهری و مخفی در انجام آزمون غیرمخرب بر روی

نتایج حاصل از انجام آزمون غیرمخرب تراهرتز بر روی نمونه‌ی الگوی آلومینیومی با روشهای مندرج در جدول (۱) مقایسه گردید. از تصاویر بدست آمده از روش تراهرتز قابل استنباط است که در این روش تشخیص گوشه و لبه‌ی عیوب با عمق کمتر نسبت به عیوب با عمق بیشتر بهتر است از نتایج قابل برداشت است که بیشینه طول بدست آمده از روش تراهرتز همواره ۰/۵ میلیمتر کوچکتر از مقدار اسمی آن است که نشان می‌دهد به اندازه‌ی یک پیکسل در تشخیص لبه‌ی عیب در امتداد طول و عرض اسکن خطا دارد که با میانگین‌گیری این خطا به محدوده‌ی ۰/۳ تا ۰/۴ میلیمتر کاهش می‌یابد. در اندازه‌گیری عمق با توجه به دقت ۵ میکرونی روش تراهرتز خطا در مقایسه‌ی میانگین نتایج خطایی در محدوده‌ی ۲۰ تا ۳۰ میکرومتری را شامل می‌شود. دقت روش تراهرتز در اندازه‌گیری عمق عیوب در مقایسه با CMM، میکروایکس بیشتر و در مقایسه با Contour کمتر است، در حالی که اندازه‌گیری ابعاد لبه تا لبه در مقایسه با VMM ضعیفتر است.

نتایج حاصل از انجام آزمون غیرمخرب تراهرتز بر روی نمونه‌ی الگوی پلکسی‌گلس با روشهای مندرج در جدول (۲) مقایسه گردید. دقت اندازه‌گیری ابعادی برای قطر و عمق عیوب با کولیس و ساعت اندازه‌گیری بیشتر از دقت روش تراهرتز است. اما با استفاده از روش تراهرتز عیوب مخفی درون نمونه‌ی پلکسی‌گلس با دقت قابل قبولی نسبت به روش‌های اندازه‌گیری ابعاد قابل تشخیص است. تصویر پروفایل کف عیوب با روش تراهرتز قابل تصویر کردن است در حالی که با روش‌های اندازه‌گیری ابعاد مرسوم نبوده و حداکثر و حداقل عمق برای عیوب در دسترس تخمین زده

[6] Chiou, C.P., Thompson, R.B., Winfr, W.P., Madaras, E.I., Seebo, J. (2007). Processing Terahertz ray data in space shuttle inspection. *Quant. Nondestruct. Eval.*, 894, 425-431.

[7] Wietzke, S., Jordens, C., Krumbholz, N. (2007). Terahertz imaging: A new Nondestructive technique for the quality control of plastic weld joints. *J. Eur. Op. Soc. Rapid Publ.*, 2, 212-216.

[8] Roth, D.J., Seebo, J.P., Walker, J.L., Aldrin, J.C. (2007). Signal processing approaches for Terahertz data obtained from inspection of the shuttle external tank thermal protection system foam. *Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval.*, 894, 415-424.

[9] Zhu, Y., Tian, G., Lu, R., Zhang, H. (2011). A Review of Optical NDT Technologies. *Sensors*, 11, 7773-7798.

[10] Gryzagoridis, J., Findeis, D. (2010). Impact damage detection on composites using optical NDT techniques. *Insight*, 52, 248-251

نمونه‌ها از کارایی و قابلیت بسیاری برخوردار است و استفاده از آن در صنایع مختلف تحت عنوان آزمون غیرمخرب با استفاده از امواج تراهرتز با توجه به دامنه‌ی کاربرد آن پیشنهاد می‌گردد.

۵- منابع

[1] Siegel, P.H. (2002). Terahertz technology. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 50, 910-928.

[2] Zimdars, D., White, J.S., Stuk, G. (2006). Large area terahertz imaging and Nondestructive evaluation applications. *Insight*, 48, 537-539.

[3] Karpowicz, N., Zhong, H., Xu, J., Lin, K.I., Hwang, J.S., Zhang, X.C. (2005). Nondestructive Sub-THz CW Imaging. *Proc. SPIE*, 5727, 132-142.

[4] Lee, Y. S. (2008). *Principles of Terahertz Science and Technology*, 1th ed., Springer, New York, pp 51-62.

[5] Chiou, C.P., Thompson, R.B., Winfreew, W.P., Madaras, E.I., Seebo, J. (2006). Modeling and Processing of Terahertz Imaging in Space Shuttle External Tank Foam Inspection. *Quant. Nondestruct. Eval.*, 412, 484-491.

Modern Technology of Nondestructive Test Using Terahertz Waves

Farzad Moradiannejad^{1,2}, Hamid Reza Zangeneh², Omid Panahi³, Mohsen Golzar Shahri¹, S. Mohammad Ali Mortazavi¹, Ali Soori¹

¹Iran Atomic Energy Organization, Nuclear Reactors Fuel Co., Postal code: 81465-1957

²Kashan University, Faculty of Physics, Laser & Photonic Department

³Shahid Beheshti University, Laser-Plasma Research Institute

Abstract:

In this research, the possibility of evaluating non-destructive materials using terahertz waves was investigated. For this purpose, the results of determining the specific defects dimensions on the samples of aluminum, plexiglas and ceramic zirconium dioxide with the results of dimensional measurements with methods such as Coordinate Measuring Machine (CMM), micro-X and Visual Measurement Machine (VMM) was compared. In order to conduct research, depending on the nature of the sample and the required information, two configurations (transmission and reflection) of the terahertz imaging system based on the terahertz time domain spectroscopy system were used in which the generation and detection of terahertz waves pulses were performed using a femto-second laser. The results showed that non-destructive terahertz test was used to identify defects (very shallow surface defects and hidden defects in sample tissue) and measurements were superior to some of the common methods. In the final, the terahertz wave imaging method is a non-destructive test that can compete with conventional methods.

Keywords: Nondestructive test, Terahertz waves, Teference sample, Image interpolate