

نشریه علمی-تربیتی

فناوری

آزمون‌های غیرمخرب

NONDESTRUCTIVE TESTING
TECHNOLOGY



انجمن بازرسی غیرمخرب ایران
Iranian Society for Nondestructive Testing (IRNDT)

دوره دوم، شماره سوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۷



● گزارش برگزاری پنجمین کنفرانس بین‌المللی آزمون‌های غیرمخرب ایران (IRNDT 2018)

● تغییر نام انجمن به: "انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران"

● اندازه‌گیری غیرمخرب تنش پسماند با روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی

● پیاده‌سازی سیستم تصویربرداری فراصوتی با استفاده از آرایه‌های فازی



انجمن بازرسی غیرمخرب ایران
Iranian Society for Nondestructive Testing (IRNDT)

نشریه علمی - ترویجی

فناوری آزمون های غیرمخرب

NONDESTRUCTIVE TESTING TECHNOLOGY

دوره دوم، شماره سوم، پاییز و زمستان ۱۳۹۷

- ۲ ✓ سخن سردبیر
- ۳ ✓ تغییر نام انجمن
- ۴ ✓ اعتبار علمی - ترویجی مجله فناوری آزمون های غیرمخرب
- ✓ گزارش برگزاری پنجمین کنفرانس بین المللی آزمون های غیرمخرب ایران (IRNDT2018)
- ۵
- ۸ ✓ بررسی روش تداخل سنجی برشی در تشخیص عیوب در مواد مختلف
- ۲۳ ✓ پیاده سازی سیستم تصویربرداری فراصوتی با استفاده از آرایه های فازی
- ✓ فراصوت تشخیصی، روشی غیرمخرب در کیفیت سنجی محصولات
- ۳۲ کشاورزی- غذایی
- ۴۲ ✓ تکنولوژی نوین آزمون غیرمخرب با استفاده از امواج تراهرتز
- ۵۰ ✓ اندازه گیری غیرمخرب تنش پسماند با روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی
- ✓ بررسی آزمون غیرمخرب امواج فراصوتی در اتصالات چهار ورقه ای جوش مقاومتی
- ۵۹ نقطه ای و تدوین دستورالعمل کاربردی آن در صنایع خودروسازی
- ✓ بازرسی غیرمخرب مولدهای بخار PGV-1000M نیروگاه های هسته ای روسی
- ۶۶ مدل VVER 1000

صاحب امتیاز: انجمن بازرسی غیرمخرب ایران

مدیر مسئول: مهندس میرمجید قائمی

سردبیر: دکتر فرهنگ هنرور

مدیر داخلی: دکتر محمد ابونجمی

اعضا هیات تحریریه:

دکتر محمد ابونجمی

مهندس جلال جواهری پور

دکتر امیر رفاهی اسکویی

دکتر بهروز رکرک

دکتر محمدحسین سورگی

دکتر سیدحسین صادقی

دکتر محمدرضا فراهانی

مهندس میرمجید قائمی

دکتر فرهنگ هنرور

ویراستار: مهندس میثم باباپور

کارشناس نشریه: مهندس محمد

محمودی

نشانی: تهران، خیابان کریمخان زند،

نیش خیابان آبان شمالی، ساختمان

دانشگاه علامه طباطبائی، طبقه دوم، اتاق

۲۲۷، دفتر انجمن بازرسی غیرمخرب

ایران

تلفن: ۰۲۱-۸۱۰۳۲۲۲۵

jndttech@gmail.com

www.JNDTtech.ir

(این نشریه مسئولیتی در قبال محتوای مقالات و

تبلیغات ندارد)





به نام خدا

سومین شماره مجله علمی-ترویجی انجمن بازرسی غیرمخرب ایران در زمان کوتاهی پس از برگزاری موفقیت آمیز پنجمین کنفرانس بین‌المللی آزمون‌های غیرمخرب ایران (IRNDT2018)، به چاپ می‌رسد. به همین مناسبت، در این شماره گزارشی از این کنفرانس ارائه خواهد شد. حضور آقای دکتر ساجیش کومار بابو رئیس محترم کمیته بین‌المللی آزمون‌های غیرمخرب (ICNDT) و حمایت انجمن آزمون‌های غیرمخرب آمریکا (ASNT) که با قرائت پیام آقای دکتر آرنولد بریسون دبیر اجرایی ASNT، توسط آقای مهندس مرتضی جعفری به انجام رسید، از منظر بین‌المللی جایگاه ویژه‌ای به این کنفرانس داده است. استقبال دست‌اندرکاران، سازمان‌ها و شرکت‌های مرتبط با NDT از این کنفرانس نیز همچون کنفرانس‌های قبلی انجمن بسیار چشمگیر بود.

در این شماره از مجله نیز همچون دو شماره قبل، چندین مقاله علمی و فنی در موضوعات مختلف NDT ارائه خواهد شد. این مقاله‌ها در موضوعات مختلفی از جمله آرایه‌های فازی، آزمون جوش نقطه‌ای، بازرسی مولدهای بخار، تداخل‌سنجی برشی و برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی هستند.

بر خود لازم می‌دانم از نویسندگان مقالات، داوران محترم مجله و همکاران عزیزم در دبیرخانه مجله تشکر و قدردانی به عمل آورم. همچنین، از تمامی اساتید، دانشجویان، پژوهشگران و مهندسانی، که در حوزه NDT فعالیت دارند، خواهش می‌کنم با ارسال آخرین دستاوردهای علمی و فنی خود در قالب مقاله و یا خبر، مجله‌ی خود را هر چه پر بارتر سازند.

در انتها، با توجه به نزدیکی سال نو، فرصت را مغتنم شمرده و پیشاپیش سال نو را به شما بزرگواران تبریک گفته و امیدوارم که در سایه عنایات ایزد منان، سال نو، سالی سرشار از سلامتی، موفقیت و بهروزی برای خوانندگان عزیز مجله و همه مردم کشور عزیزمان ایران باشد.

شاد و سرفراز باشید

فرهنگ هنرور

سردبیر

تغییر نام انجمن

هیئت موسس انجمن خواسته شد که چند نام را اعلام تا اعضای کمیسیون از میان آن‌ها یکی را انتخاب کنند. در آن زمان، کمیسیون نام «انجمن بازرسی غیرمخرب ایران» را انتخاب کرد. با توجه به اینکه هدف اصلی هیئت موسس، تشکیل هر چه سریعتر انجمن و آغاز فعالیت‌های مورد نیاز کشور در راستای مدیریت و ساماندهی NDT بود، در آن زمان اعتراضی به این انتخاب نشد.

حال که انجمن پس از شش سال فعالیت و برگزاری موفق چندین کنفرانس و گردهمایی، عضویت و عقد تفاهم‌نامه با سازمان‌ها و انجمن‌های معتبر بین‌المللی و کسب اعتماد جامعه NDT کشور به جایگاه قابل توجهی دست یافته است، انجمن تصمیم گرفت که این تغییر نام را هم انجام دهد که خوشبختانه مورد موافقت مراجع ذیربط قرار گرفت. هر چند این عملکرد و تلاش اعضای انجمن است که ماهیت انجمن را شکل می‌دهد، ولی قطعاً تطابق درست نام انجمن با فعالیت‌های آن و بخصوص تطابق عناوین فارسی و انگلیسی انجمن نیز بسیار مهم است و بسیار خوشحالیم که پیش از پایان دومین دوره هیئت مدیره انجمن، این امر محقق شده است.

هیئت مدیره انجمن بازرسی غیرمخرب ایران

تاریخ: ۱۳۹۷/۱۲/۰۷
شماره: ۱۱۲۰/۹۲۱
پست:

انجمن بازرسی غیرمخرب ایران

جناب آقای دکتر فرهنگ هنرور
رئیس محترم انجمن بازرسی غیرمخرب ایران

با سلام، در پاسخ به نامه شماره ۱۱۳-۹۷ مورخ ۹۷/۴/۴ جناب‌عالی، بدآگاهی می‌رساند که چنانچه صورت لاتین نام این انجمن: Iranian Society for Nandestructive Testing است، نام فارسی «انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران» صحیح است و بهتر است از این نام استفاده شود.

نسرین پرویزی
معاون گروه واژه‌گزینی

تهران، بزرگراه حقانی، بعد از ایستگاه مترو، مجموعه فرهنگستان‌ها، فرهنگستان زبان و ادب فارسی
کد پستی: ۱۵۸۴۳۳۱۱ صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۶۳۴۴ تلفن: ۰۲۱-۸۸۶۲۳۳۹-۶۸
وبسایت: www.persianacademy.ir

با کمال مسرت به اطلاع اعضای محترم انجمن و دست‌اندرکاران NDT کشور می‌رسانیم که نام «انجمن بازرسی غیرمخرب ایران» به زودی به «انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران» تغییر خواهد یافت. انجمن در آبان ماه ۱۳۹۶ درخواستی را مبنی بر تغییر نام انجمن به «انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران» به کمیسیون انجمن‌های علمی ایران تقدیم کرد. پس از برگزاری چند جلسه توجیهی برای بررسی دلایل و نیاز انجام این تغییر، سرانجام کمیسیون انجمن‌های علمی در مهرماه ۱۳۹۷ با این درخواست موافقت کرد و بزودی، پس از انجام تشریفات قانونی و طرح موضوع در مجمع عمومی، نام جدید انجمن به طور رسمی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در این خصوص استعلامی نیز از فرهنگستان زبان و ادب فارسی صورت گرفت که فرهنگستان نیز معادل بودن واژه «آزمون» با واژه انگلیسی «testing»، که در عنوان انگلیسی انجمن بکار رفته است، را مورد تایید قرار داد.

لازم به ذکر است که انجمن بازرسی غیرمخرب ایران از ابتدای شکل‌گیری نام «انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران» را مد نظر داشته و در مکاتبات اولیه برای تاسیس انجمن در سال ۱۳۹۰ از این نام استفاده می‌کرده است. اما در زمانی که تاسیس انجمن مورد موافقت کمیسیون قرار گرفت، از

پرسشنامه

تاریخ: ۱۳۹۷/۰۷/۰۷
شماره: ۱۵۴۹۳۵
پست:

انجمن بازرسی غیرمخرب ایران

جناب آقای دکتر فرهنگ هنرور
رئیس محترم انجمن بازرسی غیرمخرب ایران
با سلام و احترام

شماره پیگیری: ۷۸۴۴۲۹

به استحضار میرساند در خواست تغییر نام آن انجمن در جلسه کمیسیون مورخ ۹۷/۵/۷ مطرح و با تغییر نام انجمن بازرسی غیرمخرب به آزمون‌های غیرمخرب موافقت گردید. لازم است با رعایت تشریفات قانونی موضوع در جلسه مجمع عمومی فوق‌العاده انجمن طرح و تصویب گردد.

دبیر کمیسیون انجمن‌های علمی ایران
محمد جلالی

تهران: فرهنگستان زبان و ادب فارسی
میدان صنعت، خیابان خورشید، خیابان فرهنگ، تهران
پوش خیابان پرویز خاویز
کد پستی: ۱۵۸۷۵-۶۳۴۴ تلفن: ۰۲۱-۸۸۶۲۳۳۹-۶۸
شماره تلفن: ۸۲۳۳۱-۰۰
صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۶۳۴۴
تهران ۱۵۸۴۳۳۱۱
WebSite: www.mstt.ir
Email: info@mstt.ir

اعتبار علمی - ترویجی مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب



جمهوری اسلامی ایران
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری



شماره پستی: ۷۸۳۹۴۷

جناب آقای دکتر فرهنگ هنرور
رئیس محترم انجمن بازرسی غیر مخرب ایران

با سلام و احترام،

ضمن تشکر از اقدام شایسته آن انجمن در انتشار نشریه علمی، بازگشت به نامه ۹۶-۱۰-۱-۱۵ مورخ ۹۶/۱۰/۲۱ به استحضار می‌رساند در خواست مذکور در جلسه کمیسیون مورخ ۹۷/۶/۲۱ مطرح و با اعضای اعتبار علمی - ترویجی از شماره پاییز ۹۷ به نشریه فناوری آزمون‌های غیر مخرب با صاحب امتیازی انجمن بازرسی غیر مخرب ایران، با سردبیری فرهنگ هنرور و عضویت (فرهنگ هنرور، سید حسین صادقی، محمد ریاحی، مهدی یزدانی، احمد علی آماده، محمد ایزدچمی، محمدرضا فراهانی، امیر رفاهی اسکویی، بهروز زرگرک، میرمحمد قائمی، جلال جواهری پور) بعنوان اعضای هیأت تحریریه موافقت گردید.

مقرر شد ظرف مدت ۶ ماه اولین شماره نشریه چاپ و به دبیرخانه کمیسیون ارائه گردد. در غیر این صورت اعتبار مذکور لغو می‌گردد. ضمناً رعایت نکات ذیل تأکید شد:

- یک نسخه از هر شماره نشریه به موقع و منظم به صورت الکترونیکی به دبیرخانه کمیسیون نشریات علمی ارسال گردد.
- یک نسخه الکترونیکی از هر شماره نشریه به موقع و منظم به مرکز منطقه ای اطلاع رسانی علوم و فناوری (جهت نمایه شدن در ISC) ارسال گردد.
- در صورت عدم چاپ به موقع و یا تأخیر دو شماره در ارسال به مراکز مربوطه موضوع لغو اعتبار علمی نشریه در کمیسیون مطرح خواهد شد.
- هرگونه تغییر در انتخاب سردبیر و اعضای هیأت تحریریه باید قبلاً به تأیید کمیسیون بررسی نشریات علمی رسانده شود.
- ضروری است در راستای تسهیل و تسریع در دسترسی، از تبادلات و مکاتبات بین نویسندگان، نشریه و داوران و همچنین جلوگیری از طولانی شدن مراحل پذیرش اولیه تا پهنایی مقالات، نسبت به ایجاد پایگاه الکترونیکی و انتشار کلیه شماره های نشریه به صورت الکترونیکی بر روی سایت مذکور اقدام عاجل مبذول دارند.

تهابانی:
تهران شهرک قدس
میدان صنعت، خیابان
خوردین، خیابان هرمزان
نبش خیابان پیروزان جنوبی
کد پستی: ۶۴۸۹۱-۱۴۶۶۶
شماره تلفن: ۸۲۲۲۱۰۰
صندوق پستی:
تهران ۱۵۱۲-۱۶۶۶
Website: www.msrt.ir
Email: info@msrt.ir

هدف از انتشار مجله تخصصی «فناوری آزمون‌های غیرمخرب» ارتقای سطح دانش متخصصان، پژوهشگران، دانشجویان و دست‌اندرکاران حوزه آزمون‌های غیرمخرب و ایجاد بستری برای تبادل یافته‌ها و اطلاعات نوین علمی در زمینه‌های تخصصی این حوزه است. این مجله در نظر دارد با ساماندهی دستاوردها و اطلاعات روزآمد حوزه آزمون‌های غیرمخرب سبب تقویت پایه‌های علمی و فنی در تخصص مذکور و زیرشاخه‌های مرتبط با آن شود. همچنین ضمن کمک به گسترش ایده‌های نو و اعتلای فعالیت‌های علمی در این حوزه تخصصی، با ایجاد ارتباط مناسب بین نیازها و اطلاعات علمی و فنی، زمینه تبادل نظر در تشخیص و رفع معضلات موجود در این حوزه تخصصی را فراهم سازد.

اولین دوره این مجله از سال ۱۳۹۳ به بعد و در پی خبرنگارهای متعددی که از سوی انجمن منتشر می‌گردید، با همت و تلاش خالصانه اعضای انجمن بخصوص اعضای شورای انتشارات، منتشر و در اختیار اعضای انجمن قرار گرفت. با توجه به اینکه هیچ مجله‌ای با اعتبار علمی - ترویجی که بتواند مقالات، مطالعات و پژوهش‌های علمی، اخبار و یادداشت‌های تحلیلی جامعه بازرسی فنی و آزمون‌های غیرمخرب را هم در حوزه صنعتی و هم دانشگاهی

پوشش دهد، در کشور وجود نداشت، شورای انتشارات انجمن در سال‌های اخیر نسبت به اخذ اعتبار رسمی علمی - ترویجی از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری اقدام نمود. خوشبختانه پس از تشکیل هیئت تحریریه متشکل از اعضای صنعتی و دانشگاهی بر اساس مفاد آیین‌نامه مربوطه، سرانجام در سال ۱۳۹۷ اعتبار رسمی علمی - ترویجی از سوی دفتر سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی امور پژوهشی وزارت متبوع، با صاحب امتیازی انجمن بازرسی غیرمخرب ایران به این مجله اعطا گردید و همزمان در پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC) نیز نمایه شد.

ضمن تبریک صمیمانه این موضوع به همه اعضای انجمن، بار دیگر از کلیه پژوهشگران، دانشگاهیان، کارشناسان و متخصصین صنعتی در حوزه بازرسی و آزمون‌های غیرمخرب دعوت می‌نمایم تا نتایج و دستاوردهای مطالعاتی و تجربی خود و یادداشت‌های تحلیلی مرتبط را از طریق سامانه ارسال مقالات در وبگاه نشریه به نشانی www.JNDTTech.ir به دبیرخانه نشریات انجمن ارسال نمایند.

امید است که با فراهم‌سازی بستری برای تبادل یافته‌ها، دانش و فناوری آزمون‌های غیرمخرب و نیز ترویج فرهنگ صحیح بازرسی فنی و آزمون‌های غیرمخرب شاهد توسعه و گسترش روزافزون ایمنی در کشور عزیزمان باشیم.

شورای انتشارات انجمن



گزارش برگزاری پنجمین کنفرانس بین‌المللی آزمون‌های غیرمخرب ایران (IRNNDT 2018)

۱۳ و ۱۴ آبان ماه ۱۳۹۷، تهران، هتل المپیک

میثم باباپور؛ دبیر انجمن بازرسی غیرمخرب ایران

این کنفرانس که بزرگترین رویداد و هم‌اندیشی متخصصین و دست‌اندرکاران جامعه بازرسی فنی و آزمون‌های غیرمخرب در کشور است، توسط انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران (IRNNDT) بعنوان بالاترین مرجع علمی و تخصصی در این زمینه، طبق برنامه‌ریزی دوسالانه برگزار شد و انجمن صنفی شرکت‌های بازرسی فنی، سازمان‌های متعدد داخلی و خارجی و نهادهای کشوری از حامیان اصلی آن بودند. برگزاری موفق پنجمین دوره کنفرانس بار دیگر اهمیت مدیریت و ساماندهی آزمون‌های غیرمخرب در کشور را برای مخاطبین روشن‌تر ساخت. جنبه‌های مختلف بکارگیری آزمون‌های غیرمخرب و استفاده از روش‌های نوین و پیشرفته در جهان، و به تبع آن در کشور عزیزمان ایران، از یک سو و ایجاد ساختاری مناسب برای بهره‌برداری موثر از این آزمون‌ها از سوی دیگر، عمده مواردی بودند که در این کنفرانس مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

پنجمین کنفرانس بین‌المللی آزمون‌های غیرمخرب ایران از چهار بخش: ارائه مقالات علمی، برگزاری نشست‌های تخصصی، ارائه کارگاه‌های آموزشی، و برپایی نمایشگاه تخصصی تشکیل شده بود که به اختصار به هر کدام از بخش‌های فوق می‌پردازد. اگرچه برآورد اولیه از برگزاری کنفرانس آنهم در شرایط کنونی کشور و بر اساس بازخوردهای اولیه بسیار موفق ارزیابی می‌شود و علیرغم تحریم‌ها، استقبال خوبی از کنفرانس بعمل آمد به گونه‌ای که متوسط شرکت‌کنندگان در هر دو روز بالغ بر ۳۰۰ نفر بوده است، اما در این گزارش به موارد و موضوعاتی تاکید خواهد شد که می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آینده در جهت پربار بودن کنفرانس موثر واقع شده و دستگاه‌های کشوری را نیز مخاطب قرار دهد تا از مشارکت حداکثری برخوردار شد.

ارائه مقالات:

از مجموع مقالات دریافت شده در دبیرخانه علمی کنفرانس، پس از ارزیابی‌های کمیته علمی، تعداد ۶۲ مقاله بصورت شفاهی و پوستری پذیرفته و ارائه گردید. آنچه قابل توجه است، عمده و قریب به اتفاق مقالات از جامعه دانشگاهی و پژوهشگاهی بوده و علیرغم اینکه بیشتر مخاطبین این حوزه از دانش و فناوری از جامعه صنعتی کشورمان هستند اما فقط تعداد انگشت‌شماری از مقالات را به خود اختصاص داده بودند. ضمن نگاه مثبت به افزایش سطح علمی مقالات و استفاده از دانش روز و روش‌های

پیشرفته و نوین در آن‌ها، متأسفانه آنچه که از این نتایج برمی‌آید نقش کم‌رنگ صنعت و متخصصین صنعتی در انجام طرح‌های تحقیقاتی است. از طرفی بستر کاربردی بودن، در بسیاری از مقالات ارائه شده هنوز فراهم نیامده است. این در حالی است که به اذعان شرکت‌کنندگان و صنعتگران حاضر در کنفرانس، نیاز پژوهشی در بسیاری از صنایع در بهبود روش‌های موجود و بکارگیری روش‌های نوین و پیشرفته وجود دارد. امید است با فعالیت‌های "شورای صنعت و فناوری" انجمن و طبق آیین‌نامه داخلی آن که اخیراً تهیه و تصویب شده است، زمینه ارتباط هرچه موثرتر با صنعت در جهت شناسایی نیازها و همکاری با دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی وجود داشته باشد.

کارگاه‌های آموزشی:

کارگاه‌های آموزشی یکی از پرمخاطب‌ترین بخش‌های کنفرانس بود بصورتی که بقیه بخش‌ها را تحت الشعاع خود قرار داده بود. امسال به غیر از کارگاه‌هایی که مطابق دوره‌های پیشین کنفرانس جنبه آموزشی و معرفی روش‌های پیشرفته آزمون‌های غیرمخرب را داشتند، امکان پذیرش درخواست شرکت‌های صنفی جهت معرفی تجهیزات، خدمات (برندینگ) یا ارائه روش‌های خاص نیز فراهم آمده بود. با توجه به نیاز جامعه بازرسی فنی و شرکت‌های صنفی می‌توان در دوره‌های بعدی کنفرانس توجه بیشتری به این بخش معطوف داشت. ویژگی دیگر در این بخش گستره بازخوردهای مطلوب و نامطلوب مخاطبین در خصوص محل برگزاری کارگاه‌ها و نیز اطلاع‌رسانی موثرتر قبل از برگزاری کنفرانس است تا شرایط هرچه بهتری برای استفاده شرکت‌کنندگان فراهم آمده و مخاطبین بیشتری نیز جذب شوند.

نشست‌های تخصصی:

با توجه به نتایج کنفرانس قبلی و اقدامات سه ساله اخیر انجمن، در این کنفرانس توجه ویژه‌ای به این بخش معطوف شد. پس از ارزیابی‌های اولیه، موضوع تایید صلاحیت کارکنان آزمون‌های غیرمخرب و صدور گواهینامه که با نابسامانی قابل توجهی در کشور روبرو است مد نظر قرار گرفت و از آنجا که برنامه میان مدت در این رابطه توسط انجمن تهیه شده است، تبادل نظر در مورد نحوه اجرای آن از محورهای اصلی کنفرانس و نشست‌ها واقع شد. از آنجا که موفقیت این برنامه، همکاری تنگاتنگ انجمن‌های ذیربط، دستگاه‌های حاکمیتی مرتبط با موضوع و مقبولیت آن توسط نهادهای کارفرمایی را لازم دارد، جلسات متعددی با سازمان ملی استاندارد ایران، وزارت نفت و انجمن صنفی شرکت‌های بازرسی فنی برگزار شد که بر اساس موافقت مدیران ذیربط وزارت نفت و سازمان ملی استاندارد ایران و تصمیم شورای راهبری کنفرانس، مقرر شد دو نشست تخصصی برای طرح و بررسی موضوعات مبتلا به با حمایت و حضور این دستگاه‌ها برگزار گردد.

نظر به مغفول ماندن موضوع آزمون‌های غیرمخرب در صنعت سازه و ساختمان و بر اساس پیشنهاد "شورای صنعت و فناوری" انجمن مقرر شد کاربرد و وضعیت این آزمون‌ها در صنعت سازه و ساختمان نیز یکی از موضوعات نشست‌های تخصصی باشد تا نتایج آن، در ادامه فعالیت‌های انجمن پیگیری شود. وضعیت پرتونگاری صنعتی در کشور و پرداختن به چالش‌های آن، نشست چهارم کنفرانس بود که با حمایت و برنامه‌ریزی انجمن صنفی شرکت‌های بازرسی برگزار گردید.

متعاقب تصمیم شورای راهبری، قبل از برگزاری کنفرانس چندین جلسه هماهنگی در مورد هر نشست، با حضور مسئولین و صاحب‌نظران برگزار گردید. در پی جلسات هماهنگی نشست تخصصی "سیاست‌های وزارت نفت در ارتقای جایگاه آزمون‌های غیرمخرب" بنابه ارزیابی‌هایی که قبلاً در وزارت نفت انجام گرفته بود و به تشخیص آقای مهندس اصل‌عربی، مدیرکل محترم نظام مدیریت دارایی‌های فیزیکی وزارت نفت، دو موضوع مهم مدنظر این نشست قرار گرفت:

- لزوم بازنگری در آیین‌نامه و روش‌های اجرایی در انجام آزمون‌های غیرمخرب و بکارگیری روش‌های پیشرفته و نوین با بهبود کارایی در مدیریت و استفاده از مشاورین آزمون‌های غیرمخرب

- ارزیابی و تایید صلاحیت و شناسایی گواهینامه‌های معتبر کارکنان آزمون‌های غیرمخرب در صنعت نفت

در جلسات هماهنگی با سازمان ملی استاندارد ایران، آقای دکتر خاکی‌فیروز، رئیس محترم مرکز ملی تایید صلاحیت ایران تاکید داشتند که در حال حاضر، وضعیت تایید صلاحیت کارکنان آزمون‌های غیرمخرب نابسامان بوده و گواهینامه‌هایی که بدون

رعایت ضوابط صادر می‌شود باید در اسرع وقت اصلاح و استقرار استاندارد ISO 9712 مدنظر قرار گیرد. همچنین متقاضی مرجع صدور گواهینامه لازم است هرچه زودتر الزامات استاندارد ISO 17024 را استقرار دهد.

نشست تخصصی ساختمان با حضور مسئولین نظام مهندسی ساختمان استان تهران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی، اساتید دانشگاه و کارشناسان این حوزه برگزار شد که بحث‌های بسیار مفید کاربردهای آزمون‌های غیرمخرب در این حوزه مطرح و با نگاه ویژه به موضوع زلزله که برای کشور بسیار مهم است، نقش آزمون‌های غیرمخرب در طراحی، اجرا و نظارت بررسی گردید. براینند نشست حاکی از این بود که در این حوزه کار بسیار اندکی انجام یافته و می‌توان اذعان داشت که مغفول مانده است. امید است با توجه ویژه در ادامه فعالیت‌های انجمن ضمن ترویج بکارگیری بازرسی فنی و آزمون‌های غیرمخرب در این حوزه از صنعت، فرهنگ صحیح اجرای آن‌ها و صلاحیت کارکنان در اجرا مورد تاکید قرار گیرد.

نشست تخصصی "وضعیت پرتونگاری در کشور و چالش‌های آن" نیز با حضور مسئولین انجمن صنفی شرکت‌های بازرسی فنی و کارشناسان سازمان انرژی اتمی ایران در فضایی سازنده و با هدف تعامل هرچه بیشتر برای حفظ ایمنی و تاکید بر همکاری‌های بیشتر برگزار گردید.

نمایشگاه تخصصی جانبی:

علیرغم وجود تحریم‌ها و به تبع آن عدم استقبال شرکت‌ها در عرضه محصولات شرکت‌های خارجی که ممکن است عواقبی به همراه داشته باشد، استقبال خوبی به عمل آمد و شرکت‌های تامین کننده تجهیزات بازرسی فنی و آزمون‌های غیرمخرب در فضای نمایشگاهی بالغ بر ۳۵۰ متر مربع محصولات خود را عرضه نمودند.

همچنین آنچه قابل ذکر است حضور، همکاری و حمایت بی شائبه جامعه جهانی آزمون‌های غیرمخرب از انجمن NDT ایران و پنجمین کنفرانس بین‌المللی آزمون‌های غیرمخرب ایران است. حضور افتخارآمیز آقای دکتر ساجیش کومار بعنوان رئیس کمیته جهانی آزمون‌های غیرمخرب (ICNDT) در کنفرانس و ارائه سخنرانی کلیدی در خصوص استقرار استاندارد تایید صلاحیت ISO 9712 و اعلام حمایت همه جانبه ایشان از برنامه‌های انجمن در راستای استقرار نظام تایید صلاحیت مرکزی در ایران، حضور آقای مهندس مرتضی جعفری بعنوان نایب رئیس شورای تایید صلاحیت انجمن آزمون‌های غیرمخرب آمریکا (ASNT) و قرائت پیام انجمن ASNT در حمایت از کنفرانس، و همچنین ارسال پیام‌های حمایتی جداگانه از سوی آکادمی بین‌المللی آزمون‌های غیرمخرب (Academia NDT International) و انجمن آزمون‌های غیرمخرب آلمان (DGZfP) بخشی از بازتاب کنفرانس در بعد بین‌الملل بود. همچنین در حاشیه این کنفرانس جلسه سازنده‌ای با حضور رئیس انجمن، رئیس کمیته جهانی آزمون‌های غیرمخرب (ICNDT)، رئیس مرکز ملی تایید صلاحیت ایران، رئیس انجمن صنفی شرکت‌های بازرسی فنی و مدیرانی از سازمان انرژی اتمی ایران و وزارت نفت با موضوع استقرار نظام تایید صلاحیت مرکزی در ایران تشکیل گردید.

در نهایت از کلیه اندیشمندان، صاحب‌نظران و اعضای محترم انجمن که مشوق ما بودند و از همه دست اندرکاران و حامیان عزیز که برگزاری این مهم را ممکن ساختند، بویژه شرکت محترم خانه صنعت باستان (گروه بازرگانی AHB)، شرکت محترم پارس ایزوتوپ و گروه محترم صنعتی ایران خودرو که حامیان مالی انجمن در برگزاری این کنفرانس بودند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم. بدون شک، این حمایت و استقبال، بار خطیر مسؤلیت ما را برای ادامه کار و برآورد انتظارات بحق جامعه آزمون‌های غیرمخرب ایران سنگین‌تر ساخته است. انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران از همه اعضا و دست اندرکاران NDT در کشور یاری می‌طلبد و از نظرات و پیشنهادهای شما عزیزان به گرمی استقبال می‌کند تا با مساعدت جمعی، زیرساخت‌های لازم برای بکارگیری صحیح و موثر آزمون‌های غیرمخرب در کشور از جمله استقرار نظام تایید صلاحیت مرکزی کارکنان آزمون‌های غیرمخرب فراهم شود. قطعاً با سعی و تلاش جمعی و با مشارکت و همفکری همه اعضای انجمن راه دشواری که در پیش داریم آسان‌تر خواهد شد. انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران از ابتدای تشکیل مصمم بوده است که از مشارکت همه اندیشمندان، صاحب‌نظران و دست‌اندرکاران NDT در جهت پیشبرد اهداف والای انجمنی بهره‌گیرد. امیدواریم که در آینده نیز انجمن بتواند این رویکرد اساسی خود، که همانا متعلق دانستن انجمن به تک تک اعضای آن است، را همچنان دنبال نماید تا شاهد پیشرفت و موفقیت روزافزون انجمن و همه اعضای آن باشیم.

بررسی روش تداخل سنجی برشی در تشخیص عیوب در مواد مختلف

فرزاد بناکار^{۱*}، داود اکبری^۲

^۱ کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران

^۲ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران

* f_banakar@yahoo.com

چکیده

روش تداخل سنجی برشی یا برش‌نگاری، یکی از روش‌های نوری غیرتماسی و تمام-ناحیه برای ارزیابی غیرمخرب قطعات و مجموعه‌ها می‌باشد. در این روش گرادیان جابه‌جایی سطح به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. پس از پردازش تصویر، الگوهای هاله‌ای سطح تحت بارگذاری بدست می‌آید. از این روش به طور عمده در پیدا کردن عیوب سطحی و زیر سطحی در قطعات استفاده می‌شود. سایر کاربردهای برش‌نگاری شامل اندازه‌گیری کرنش، شناسایی خواص مواد، ارزیابی تنش‌های پسماند، تشخیص نشی، مطالعه ارتعاشات سازه و اندازه‌گیری‌های سه بعدی می‌باشد. به دلیل اندازه‌گیری مستقیم گرادیان‌های جابه‌جایی و حساس نبودن به ارتعاشات محیط، برش‌نگاری علاوه بر محیط‌های آزمایشگاهی، کاربرد بسیار گسترده‌ای در محیط‌های صنعتی دارد که این ویژگی باعث تمایز این روش با سایر روش‌های نوری شده‌است. از این روش بیشتر در شناسایی عیوب قطعات مواد مرکب و فلزی استفاده می‌شود. در این مقاله به بررسی تکنیک‌ها، تجهیزات، نحوه‌ی عملکرد، پردازش تصاویر، نوع بارگذاری با توجه به جنس قطعه و نوع عیب با تاکید بر چند پژوهش کاربردی در این زمینه، پرداخته شده‌است.

واژگان کلیدی: تداخل سنجی برشی، ارزیابی غیرمخرب، اندازه‌گیری کرنش

۱- مقدمه

با توجه به پیشرفت‌های تکنولوژی در سال‌های اخیر و استفاده از قطعات و مجموعه‌های حساس و پیشرفته، لزوم وجود روش‌های بازرسی غیرمخرب برای تشخیص عمر باقی‌مانده‌ی قطعات و همچنین تشخیص وجود یا عدم وجود عیب و ناپیوستگی در آنها بیش از پیش حس می‌شود. روش‌های قدیمی و بازرسی‌های مخرب، به قطعه آسیب وارد می‌کنند و در مواردی که نیاز به سالم نگه داشتن قطعه است، نمی‌توان از این روش‌ها استفاده کرد. از طرفی بارگذاری‌های خستگی نیز می‌تواند به مرور زمان عیوب و ترک‌های ریز را گسترش داده و منجر به ناکارآمدی مجموعه و قطعه‌ها بشود. از این رو انجام آزمون‌های غیرمخرب در تمام مراحل طراحی، ساخت و نگهداری مجموعه از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد [۱].

طی سال‌های اخیر تجهیزات و روش‌های گوناگونی برای بررسی و آزمون‌های غیرمخرب به وجود آمده و گسترش یافته است. هر کدام از این روش‌ها بر اساس مجموعه‌ای از پارامترها برای بررسی و انجام آزمون انتخاب می‌شوند. از جمله این پارامترها می‌توان به جنس قطعه، نوع عیوب

احتمالی، محدودیت‌های دسترسی به قطعه یا مجموعه، قابل حمل بودن تجهیزات، ملاحظات اقتصادی، سرعت انجام بازرسی و ... اشاره نمود [۲]. یکی از روش‌های نوین و کارآمد در زمینه‌ی آزمون‌های غیرمخرب، روش تداخل سنجی برشی و یا در اصطلاح، برش‌نگاری است که بر پایه‌ی تداخل موج لیزر تک‌رنگ بازتابی از سطح جسم می‌باشد. کاربردهای زیادی می‌توان برای این روش ذکر کرد از جمله: اندازه‌گیری ابعادی، تعیین عیوب و لایه لایه شدن‌های زیر سطحی، تعیین میزان تنش‌های پسماند، بررسی ویژگی‌های میکروساختاری، تعیین خواص مواد و خواص مکانیکی. دو کاربرد بسیار موفق روش برش‌نگاری در صنعت تایر سازی برای تشخیص عیوب مختلف تایرها و در مواد مرکب و ساختارهای پلیمری برای تشخیص لایه لایه شدن و وجود حفره و ترک در آنها می‌باشد [۳].

کرنش و پارامترهای مرتبط با آن، از ویژگی‌های خاص یک نمونه می‌باشند که اندازه‌گیری آنها می‌تواند کمکی بزرگ برای شناسایی درست ویژگی‌های قطعه نماید. روش برش-نگاری دیجیتال قادر است کرنش‌های سطحی بخشی از جسم را که در معرض تابش نور لیزر قرار گرفته‌است، نمایان

دو ورق نازک آلومینیوم-مس را توسط روش برش‌نگاری، به کمک بارگذاری حرارتی مورد بررسی قرار دادند و به خوبی توانستند مکان‌های جوش نخورده و جدا شده را تشخیص دهند. سوچاتا و همکاران [۸] با بررسی سه سطح انحنای دار از جنس مواد مرکب آلومینیوم و پلیمرهای تقویت شده با الیاف کربن که دارای عیوب مشخص بودند، به این نتیجه رسیدند که روش برش‌نگاری، محدود به سطوح صاف و مسطح نمی‌باشد و می‌تواند سطوح داخلی و خارجی قطعات دارای انحنای مانند لوله‌ها و پروفیل‌ها را بازرسی کند. اکبری و همکاران [۹] پارامترهای موثر در روش برش‌نگاری را برای تشخیص ترک روی مواد مرکب را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پارامتری بعدی به نام ضریب بار را برای توصیف حالت بارگذاری در منطقه‌ی کشسان تعریف کردند و بازرسی را برای حالت‌های مختلف این ضریب انجام دادند. علاوه بر این، اثر اندازه‌ی برش و زاویه‌ی قرارگیری ترک را مورد بررسی قرار دادند. ژانگ و همکاران [۱۰] از بارگذاری ارتعاشی به کمک پیزوالکتریک برای تشخیص ترک روی نمونه‌های فلزی استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند زمانی بهترین نتایج بدست می‌آید که فرکانس ارتعاشات، به فرکانس تشدید پیزوالکتریک نزدیک باشد و با این بارگذاری بهینه توانستند ترک‌هایی به عمق ۱۰ میلی‌متر را در نمونه‌های آلومینیومی، تشخیص دهند.

در این مقاله به بررسی کامل چیدمان، تئوری و پارامترهای اساسی روش برش‌نگاری دیجیتال پرداخته شده است. در انتها، تعدادی از مهمترین پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، به طور کامل بررسی شده اند.

۲- تجهیزات و چیدمان برش‌نگاری

در روش برش‌نگاری دیجیتال، از تداخل‌گر مایکلسون^۱ برای ایجاد برش در تصاویر استفاده می‌شود. در ابتدا نمونه‌ای از قطعه کار که تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، تهیه می‌شود و در مکان خود محکم می‌شود. لیزر تک رنگ که در جلوی آن از لنز واگرا کننده برای گسترش نور قرار داده می‌شود، برای روشن کردن سطح قطعه استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری به کمک روش برش‌نگاری، سطح مورد مطالعه می‌بایست از لحاظ نوری، زبر باشد. پرتو لیزر به سطح

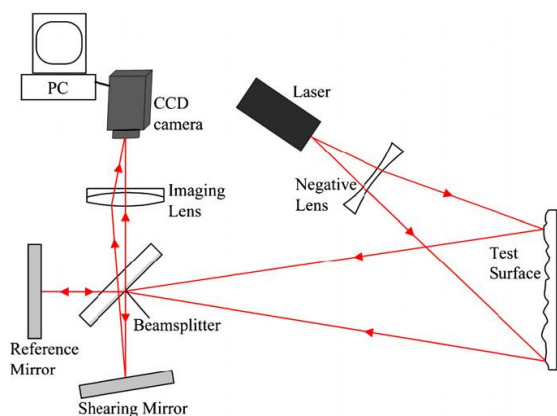
سازد. از آنجا که با بارگذاری در قطعات، معمولاً در نواحی اطراف عیوب (نظیر انواع ترک‌ها) تمرکز کرنش ایجاد می‌شود، می‌توان با اندازه‌گیری کرنش‌های سطحی و تعیین تغییرات و محل‌های تمرکز آنها در بخش‌های مختلف جسم، عیوب را شناسایی و اندازه‌گیری نمود. از طرفی از آنجا که در روش برش‌نگاری، کرنش‌ها به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شوند، حساسیت شناسایی عیب حتی نسبت به سایر روش‌های نوری نیز بیشتر است. از جمله محدودیت‌های این روش می‌توان به عدم شناسایی عیوب در عمق قطعه اشاره کرد [۴]. پیش از برش‌نگاری از روش‌هایی همچون تداخل-سنجی الگوی لکه‌ای الکترونیکی (ESPI) و هولوگرافی^۲ استفاده می‌شد. در روش هولوگرافی، تصاویر برش خورده‌ی تداخلی بر روی فیلم‌های هولوگرافی ثبت می‌شود. روش ESPI و هولوگرافی از لحاظ چیدمان، مشابه با روش برش-نگاری می‌باشند تنها با این تفاوت که در ESPI و هولوگرافی یک پرتوی نور مرجع باید به طور مستقیم از لیزر به دوربین وارد شود که باعث حساس شدن سیستم به ارتعاش و اختلال‌های محیط می‌شود. به همین دلیل برای از بین بردن این عیب، روش برش‌نگاری پیشنهاد شد به نحوی که در این روش دو پرتو نور بازتاب شده از سطح قطعه دریافت می‌شود، بنابراین حساسیت به نویز تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابد [۵].

ز روش تداخل‌سنجی برش‌نگاری، نخستین بار برای اندازه‌گیری ممان خمشی در تیر توسط لیندرتز و باترزدر سال ۱۹۷۳، استفاده شد. در اوایل سال ۱۹۸۰ میلادی با تلاش‌های سه محقق، جان بوترز در انگلستان و ناکادات در ژاپن و مایکهنگ در آمریکا از دوربین الکترونیکی و تصاویر دیجیتالی استفاده شد که بعد از آن با اختراع دوربین مخصوص برش‌نگاریبه عنوان یک روش بازرسی غیرمخرب معرفی شد و اولین بار در سال ۱۹۸۷ روی بمب افکن USAF B2 بازرسی انجام شد [۶]. پژوهش‌هایی نیز در زمینه‌ی تشخیص عیوب به کمک روش برش‌نگاری صورت گرفته که بیشتر بر روی عیوب بین لایه‌ای مانند: ایجاد حفره بین لایه‌ها و جدایش بین لایه‌ای متمرکز بوده اند و تشخیص ترک‌های زیرسطحی، نیاز به بررسی بیشتری دارد. جیا و همکاران [۷] کیفیت جوش فراصوتی ایجاد شده بر روی

¹ Electronic speckle pattern interferometry

² Holography

³ Michelson interferometer



شکل ۱. شماتیک سیستم برش‌نگاری بر پایه‌ی تداخل‌سنجی برشی مایکلسون. این تجهیزات برای اندازه‌گیری مشتق‌های جابه‌جایی در خارج صفحه می‌باشد. [۱۲]

۳- تئوری برش‌نگاری

شدت پرتو بازتاب شده از سطح و ثبت شده توسط صفحه دوربین ناشی از دو تصویر برش خورده قبل از بارگذاری I می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$I = I_0(1 + \mu \cos \theta) \quad (1)$$

I_0 شدت نور متوسط زمینه، μ اندازه مدول تداخل، θ زاویه فاز تصادفی می‌باشد. بعد از اینکه بارگذاری انجام شد و جسم تغییر شکل یافت، توزیع شدت الگوی نقطه‌ای به آرامی تغییر می‌کند و به I' تبدیل می‌شود که توسط رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$I' = I_0(1 + \mu \cos(\theta + \Delta\phi)) \quad (2)$$

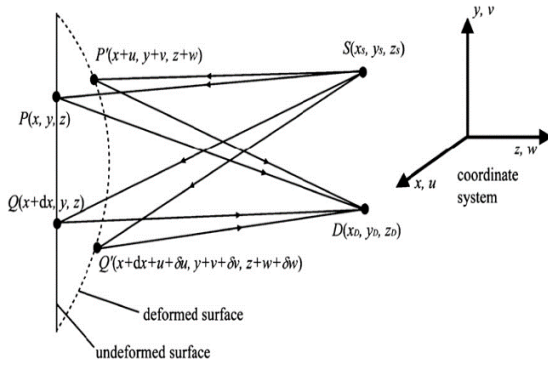
که در آن $\Delta\phi$ به تغییرات فاز که به سبب تغییر شکل سطح ایجاد می‌شود، وابسته است. چون هر دو معادله دارای زاویه فاز تصادفی می‌باشند، با نگاه کردن به تصاویر چیزی تشخیص داده نمی‌شود. با وجود این، محاسبه‌ی اختلاف شدت دو الگوی نقطه‌ای به یک الگوی حاشیه‌ای و هاله‌ای قابل مشاهده منجر می‌شود که توسط رابطه ۳ بیان می‌شود:

$$I_d = 2I_0 \left[\mu \cos\left(\theta + \frac{\Delta\phi}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \right] \quad (3)$$

رابطه (۳) تشکیل الگوی هاله‌ای که فاز $\Delta\phi$ را توصیف می‌کند، بیان می‌کند که در آن حاشیه‌های سیاه با $\Delta\phi = 2n\pi$ و $n = 1, 2, 3, \dots$ مطابقت می‌کند که در اصل یک دسته حاشیه هستند و هاله‌های روشن با نیم دیگر دسته‌های حاشیه مطابقت می‌کند.

تابنده می‌شود و به این طریق الگوی لکه‌ای روی تصاویر تشکیل می‌شود [۱۱]. در قسمت بعدی تداخل‌گر مایکلسون قرار داده شده که پرتوهای بازتاب شده از سطح قطعه را می‌تواند به حالت‌های مختلف برش دهد. برش در اینجا به معنی جابه‌جایی تصویر است. زمانی که جسم با دو مسیر یکسان تصویر شود، تصاویر بر یکدیگر منطبق می‌شوند. در اینجا برش تصویر اتفاق نمی‌افتد حتی اگر دو تصویر وجود داشته باشد. زمانی که با دو مسیر مستقل تصویر شود، دو تصویر می‌توانند به طور مستقل دست‌کاری شوند، به این معنی که دو تصویر برش خورده با فازهای متفاوت روی هم ایجاد می‌شود و توسط دوربین ضبط می‌شود. یک آینه برای برگرداندن پرتو به سطح قطعه که ثابت در محل خود قرار دارد در پشت تداخل‌گر است. آینه‌ی دیگری که زاویه‌ی آن متغیر است برای ایجاد زاویه‌ی های برش دلخواه وجود دارد. با تغییر این زاویه، فاز پرتوهای خروجی از تداخل‌گر تغییر می‌کند که با توجه به نوع قطعه و بارگذاری، باید این زاویه به طور دقیق محاسبه شود. پس از برش خوردن تصاویر، لنز همگرا و متمرکز کننده در جلوی دوربین قرار داده می‌شود تا تصویرهای ایجاد شده در تداخل‌گر روی هم قرار گیرند و به دوربین برسند. شکل ۱ چیدمان نوری برش‌نگاری دیجیتال در حالت خارج صفحه^۱ به منظور بدست آوردن مشتق‌های جابه‌جایی را نشان می‌دهد. در انتها یک دوربین CCD برای ضبط تصاویر قرار داده شده است که خروجی دوربین به رایانه برای پردازش تصویر متصل است. نکته‌ی بسیار مهم فاصله‌های بین هر یک از تجهیزات می‌باشد. یعنی باید در فاصله‌ی بهینه نسبت به یکدیگر و نسبت به نمونه قرار بگیرند تا تصاویر با بهترین کیفیت ایجاد شود. بارگذاری مناسب و بهینه در بدست آوردن تصاویر با دقت بالا و پیدا کردن عیوب، نقش اساسی دارد. این بارگذاری به صورت‌های مختلف ممکن است اعمال شود از جمله: فشاری، حرارتی، خلاء نسبی، کششی، ارتعاشی، صوتی. توسط دوربین، عکس‌هایی از سطح قطعه قبل و بعد از بارگذاری گرفته می‌شود. پس از پردازش تصاویر توسط نرم‌افزار، عکس‌ها از هم کم می‌شوند و الگوهای فازی و الگوهای هاله‌ای بدست می‌آید که از تحلیل آنها می‌توان به وجود عیب یا ناپیوستگی، پی برد.

¹ Out of plane



شکل ۲. مسیر پرتو تابشی و بازتابی از سطح، قبل و بعد از بارگذاری. [۱۲]

که در آن:

$$R_D = (x_D^2 + y_D^2 + z_D^2) \quad (۶)$$

$$R_s = (x_s^2 + y_s^2 + z_s^2)$$

با جمع روابط (۵) و (۶) خواهیم داشت:

$$A = \frac{x - x_D}{R_D} + \frac{x - x_s}{R_s} \quad (۷)$$

$$B = \frac{y - y_D}{R_D} + \frac{y - y_s}{R_s}$$

$$C = \frac{z - z_D}{R_D} + \frac{z - z_s}{R_s}$$

با جایگذاری رابطه (۷) در (۵) داریم:

$$\Delta L_p = Au + Bv + Cw \quad (۸)$$

بعد از بارگذاری، نقطه‌ی Q که مانند نقطه‌ی P پرتو لیزر به آن تابیده است، به دلیل تغییر شکل سطح قطعه به نقطه

$$Q'(x + dx + u + \delta u, y + v + \delta v, z + w + \delta w)$$

منتقل می‌شود که در آن $u + \delta u$ و $v + \delta v$ و

$w + \delta w$ به ترتیب مولفه‌های x و y و z بردار جابجایی

برای نقطه Q می‌باشند. تغییر مسیر نوری برای نقطه Q

برابر است با [۱۲]:

$$\Delta L_Q = A(u + \delta u) + B(v + \delta v) \quad (۹)$$

$$+ C(w + \delta w)$$

مسیر نوری نسبی، از تفریق کردن دو رابطه (۸) و (۹) به

دست می‌آید:

$$\Delta L_Q - \Delta L_p = A \delta u + B \delta v + C \delta w \quad (۱۰)$$

اگر میزان برش dx کوچک باشد، تفاضل جابه‌جایی با

مشقت جابه‌جایی تقریباً برابر می‌شود و تفاضل فاز نوری

بدست می‌آید:

سپس به بررسی ارتباط بین فاز الگوی هاله‌ای و

مشقت‌های جابجایی می‌پردازیم. مرکز مختصات بر روی

مرکز سطح قطعه در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل (۲)

فرض می‌شود نقطه‌ی دلخواه $P(x, y, z)$ بر روی سطح

قطعه قرار دارد. نقطه‌ی خروجی پرتوی لیزر

$S(x_s, y_s, z_s)$ می‌باشد که بر نقطه P بر روی سطح

قطعه تابیده می‌شود. تصویر بازتابی از سطح، بعد از عبور از

تداخل‌گر، در نقطه $D(x_D, y_D, z_D)$ بر روی

آشکارکننده قرار می‌گیرد. بعد از بارگذاری روی قطعه، نقطه

P به نقطه $P'(x + u, y + v, z + w)$ منتقل می‌شود که

در اینجا (u, v, w) بردار جابجایی در نقطه P می‌باشد.

راستای قرارگیری دوربین نیز به سمت محور Z است.

تغییر مسیر برای پرتو از نقطه P بعد از تغییر شکل طبق

رابطه (۴) می‌باشد: [۱۲]

$$\Delta L_p = (SP' + PD) - (SP + PD) \quad (۴)$$

که در آن:

$$SP = ((x - x_s)^2 + (y - y_s)^2 + (z - z_s)^2)^{1/2}$$

$$PD = ((x - x_D)^2 + (y - y_D)^2 + (z - z_D)^2)^{1/2}$$

$$SP' = ((x + u - x_s)^2 + (y + v - y_s)^2 + (z + w - z_s)^2)^{1/2}$$

$$P'D = ((x + u - x_D)^2 + (y + v - y_D)^2 + (z + w - z_D)^2)^{1/2}$$

با بسط چند جمله‌ای رابطه (۴) و در نظر گرفتن درجه

اول، خواهیم داشت: [۱۲]

$$\Delta L_p = \left(\frac{x - x_D}{R_D} + \frac{x - x_s}{R_s}\right)u \quad (۵)$$

$$+ \left(\frac{y - y_D}{R_D} + \frac{y - y_s}{R_s}\right)v$$

$$+ \left(\frac{z - z_D}{R_D} + \frac{z - z_s}{R_s}\right)w$$

می‌باشد. دو الگوی لکه‌ای از قطعه، یکی قبل از بارگذاری و دیگری بعد از بارگذاری توسط دوربین CCD ضبط شد. تفاوت این دو الگوی لکه‌ای باعث آشکار شدن الگوهای هاله‌ای می‌شود که قادر هستند مشتق‌های جابه‌جایی را با توجه به جهت برش تصویر، نشان دهند.

نمونه‌های تحت آزمایش شامل دو صفحه از نوع پلیمر پی‌وی‌سی و پلی اتیلن چگالی بالا با ابعاد $10 \times 120 \times 50$ میلیمتر مکعب و همچنین یک صفحه‌ی فلزی از جنس آلومینیوم ۲۰۲۴ با ابعاد $3 \times 200 \times 40$ میلیمتر مکعب، می‌باشد. جدول ۱ برخی خواص این نمونه‌ها را مشخص می‌کند.

جدول ۱. خواص نمونه‌های تحت آزمایش [۱۲]

نوع مواد	مدول یانگ	انبساط حرارتی	حرارت ویژه	رسانایی گرمایی
	Gpa	۱۰-۶ /k	J/Kg K	W/m K
پی‌وی‌سی	۴	۶۰	۲۵۰۰	۰,۲۵
پلی اتیلن	۱,۲	۱۸۰	۱۸۰۰	۰,۲۵
آلومینیوم	۷۰	۲۳	۹۱۰	۲۳۷

عیوب مصنوعی شامل ترک‌ها و سوراخ‌ها با اندازه‌ها و عمق‌های مختلف در نمونه ایجاد شد. بارگذاری حرارتی توسط تفنگ حرارتی در سطحی به قطر ۶۰ میلیمتر از جلو و پشت قطعه اعمال گردید. به منظور بهبود الگوهای هاله‌ای، تمام سطح نمونه‌ها با اسپری رنگ سفید پوشانده شد. برای آزمایش نمونه‌های پلیمری، چند صفحه با عیوب مصنوعی تهیه شد، به گونه‌ای که:

ابتدا یک سوراخ به قطر ۱۰ میلیمتر در عمق ۰,۵ میلیمتر در پشت نمونه ایجاد شد. سپس این قطعه مورد ارزیابی برش‌نگاری قرار گرفت. اگر این سوراخ از روش بارگذاری حرارتی تشخیص داده نشود، عمق سوراخ را ۰,۵ میلیمتر افزایش دادند و دوباره نمونه را بازرسی کردند. این فرآیند تا زمانی که سوراخ در عمق قابل شناسایی قرار بگیرد، ادامه پیدا می‌کند. سپس همین روش برای سوراخ با قطرهای ۸، ۴ و ۲ میلیمتر تکرار شد.

در نمونه‌های آلومینیومی، سوراخ و ترک‌های ایجاد شده مطابق شکل ۳ می‌باشند. ترک‌های ایجاد شده همگی دارای عرض یکسان برابر با ۰,۲ میلیمتر ولی طول و عمق متفاوت می‌باشند.

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (A \frac{\partial u}{\partial x} + B \frac{\partial v}{\partial x} + C \frac{\partial w}{\partial x}) dx \quad (11)$$

در معادله (۱۱) A، B و C عامل‌های حساسیت هستند و برابر با مولفه‌های بردار حساسیت K می‌باشند و λ نیز طول موج پرتو نور است. در حالت کلی اندازه‌گیری مشتق جابه‌جایی، رابطه اصلی برش‌نگاری به صورت رابطه‌ی ۱۲ می‌باشد: [۱۲]

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (k_x \frac{\partial u}{\partial x} + k_y \frac{\partial v}{\partial x} + k_z \frac{\partial w}{\partial x}) dx \quad (12)$$

که در آن $K = (k_x, k_y, k_z)$ مولفه‌های بردار حساسیت می‌باشند و بستگی به جهت روشن کردن قطعه توسط لیزر و جهت مشاهده پرتوهای بازتاب شده دارد. اگر مولفه‌های k_x و k_y خیلی کوچک باشند و بتوان از آنها صرف نظر کرد، سیستم به طور کامل نسبت به مشتق جابه‌جایی خارج صفحه حساس می‌شود. در این صورت اگر جهت روشن کردن و جهت مشاهده روی یک خط راست باشد، رابطه جابه‌جایی خالص خارج صفحه به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\lambda \Delta\varphi}{4\pi dy} \quad (13) \text{ برش تصویر در راستای } y$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta\varphi}{4\pi dx} \quad (14) \text{ برش تصویر در راستای } x$$

۴- استفاده از روش برش‌نگاری در آزمون‌های غیرمخرب

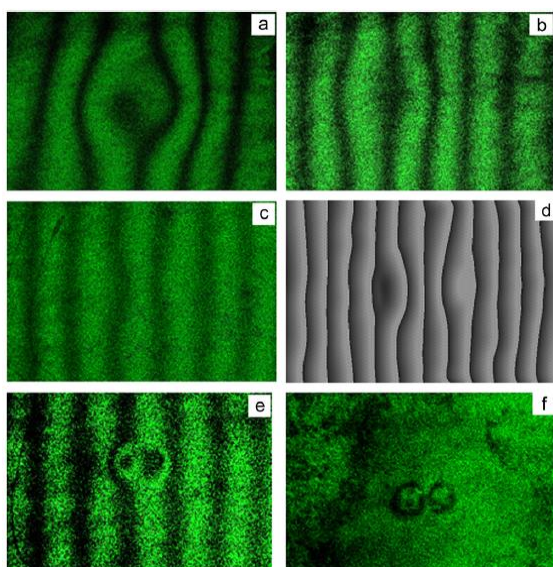
در این قسمت به بیان مهمترین فعالیت‌های صورت گرفته در رابطه با قابلیت روش برش‌نگاری در تشخیص عیوب با توجه به نوع بارگذاری و جنس نمونه انتخابی، پرداخته شده است. با توجه به ضخامت کم مواد مرکب که در ساخت قطعات مختلف استفاده می‌شود، روش برش‌نگاری در تشخیص عیوب این مواد بسیار کارآمد می‌باشد.

۴-۱- قابلیت روش برش‌نگاری در عیب‌یابی نمونه‌های آلومینیومی و پلیمری

ژانوی و همکاران در سال ۲۰۱۱ و با تاکید بر جنس‌های پلیمری و فلزی و بر اساس بارگذاری حرارتی، قابلیت روش برش‌نگاری را بررسی کردند. [۱۳]

آن‌ها از پرتو لیزر با طول موج ۵۳۲ نانومتر برای روشن کردن سطح قطعه استفاده کردند. دستگاه برش تصاویر، شامل دو منشور برشی انکساری و همچنین قطبی‌کننده

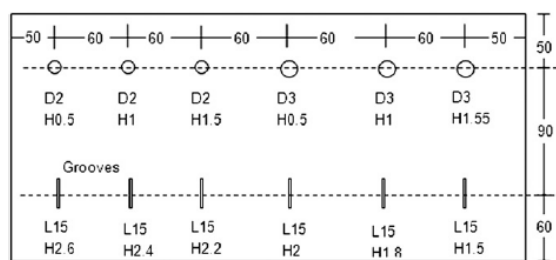
زمان تصاویر ضبط شده قبل و بعد از بارگذاری بسیار مهم است و در کیفیت الگوهای هاله‌ای و تحلیل نتایج موثر است. اگر تصاویر اولیه خیلی زود گرفته شود، ممکن است همبستگی بین تصاویر بعدی اتفاق نیفتد و منجر به الگوهای هاله‌ای ضعیف و غیر قابل شناسایی می‌شود. اگر تصاویر اولیه خیلی دیر گرفته شود، باعث کاهش امکان شناسایی عیب می‌شود. برای اینکه جواب‌های آزمایش قابل قبول باشند، هر آزمایش روی هر عیب خاص، ده مرتبه تکرار شد.



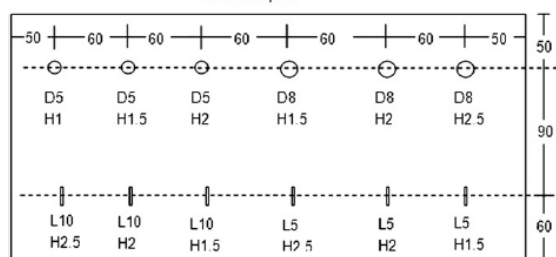
شکل ۴. الگوهای هاله‌ای برای نمونه پی وی سی با سوراخ‌های مختلف. (a) $10D, 8H$: سوراخ به قطر ۱۰ و عمق بحرانی $8, 8, 5$; (b) $8H, 8D$; (c) $6H, 6D$; (d) تکثیر حاشیه فازی برای قسمت c; (e) $4H, 4D$; (f) $2H, 2D, 13$

یکی از مشکلات ذاتی برش‌نگاری، کیفیت پایین الگوهای هاله‌ای و در نتیجه دقت پایین تشخیص عیب‌ها می‌باشد. در این مقاله از تکنیک فاز هندسی دیجیتالی در تکثیر حاشیه‌ها که از روش‌های پردازش تصویر می‌باشد، برای الگوهای مشکوک استفاده شد. در شکل ۴ قسمت (d) برای واضح‌تر شدن الگوی هاله‌ای از تکثیر هاله‌ها و نازک کردن آنها استفاده شد که بسیار راحت‌تر می‌توان تحلیل نمونه را انجام داد. نتایج آزمایش‌ها برای دو نمونه پلیمری با جنس‌های مختلف تقریباً یکسان بوده است. همچنین، قابلیت برش‌نگاری در تشخیص عیوب زمانی که عمق عیوب افزایش یابد و یا اندازه‌ی آنها کوچک شود، به سرعت کم می‌شود. رابطه‌ی بین قطر سوراخ و عمق بحرانی که در شکل ۵ نمایش داده شده است را می‌توان به عنوان منطقه‌ی

در اینجا عمق عیب، نزدیکترین فاصله‌ی بین سطح نمونه و مرز عیب است. یعنی برای سوراخ‌های کروی عمق عیب برابر فاصله‌ی بین سطح نمونه و سطح بالایی سوراخ است و برای عیوب سطحی، این فاصله از سطح نمونه تا سطح زیرین عیب می‌باشد. روش انجام آزمایش مشابه نمونه‌های پلیمری بود. به دلیل اینکه رسانایی گرمایی آلومینیوم بسیار بیشتر از پلیمرها است، حرارت اعمال شده به سطح آلومینیوم سریع منتقل می‌شود و تغییر شکل نمونه خیلی کوتاه و گذرا می‌شود و الگوهای هاله‌ای نامشخصی بدست آمد. برای رفع این مشکل، تغییرات دمایی بالاتری جهت اعمال نیروی حرارتی نیاز است. برای تشخیص ترک‌ها، جهت‌های متفاوت صفحه برش شامل: موازی، عمود و با زاویه‌ی مایل نسبت به جهت ترک، استفاده شد. تمامی مشاهده‌ها از روی سطح جلوی نمونه و عیوب ایجاد شده در پشت نمونه انجام شد.



Aluminium plate-1

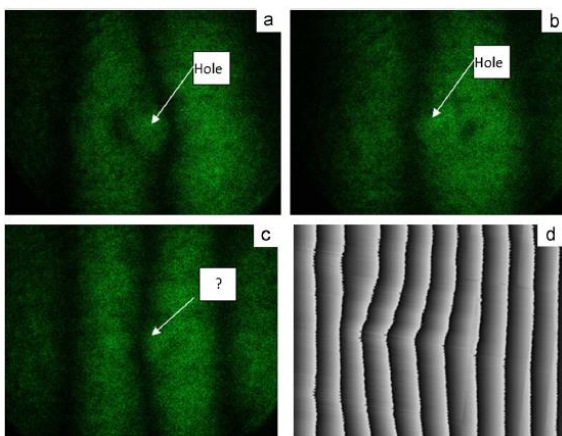


Aluminium plate-2

شکل ۳. دو صفحه‌ی آلومینیومی با سوراخ و ترک‌های ایجاد شده در آنها (D: قطر سوراخ، H: عمق عیب، L: طول ترک). [۱۳]

به منظور یکسان سازی شرایط در طول آزمایش، بارگذاری حرارتی روی نمونه‌های پلیمری در مدت ۴ ثانیه و با توان ۲۰۰۰ وات انجام شد. فاصله‌ی بین خروجی تفنگ حرارتی و سطح نمونه تقریباً ۲۰ میلی‌متر تنظیم شد. شکل ۴ تصاویر برش‌نگاری و الگوهای هاله‌ای نمونه پی وی سی با سوراخ‌های مختلف را نشان می‌دهد که در آنها تمامی عمق عیوب، عمق بحرانی هستند، یعنی بیشترین عمقی از سطح نمونه که عیب قابل شناسایی بوده است.

دلیل که رسانایی گرمایی آلومینیوم بسیار بیشتر از پلیمرها است و به سرعت نمونه تغییر شکل می‌دهد. در این حالت به پردازش تصویرهای اضافی و دوربین‌های با سرعت عکسبرداری بالاتر در حالت آنالیز نیاز می‌شود. برای غلبه بر این مشکل، از کم کردن تصاویر به صورت آنالیز استفاده نشد و به جای آن تصویرهای زیاد و خامی از نمونه در هر لحظه قبل و بعد از بارگذاری گرفته شد و سپس با پردازش تصویر الگوها ظاهر شدند. شکل ۶ برخی عیوب نمونه آلومینیومی را نشان می‌دهد که در یکی از آنها از پردازش تصویر اضافی برای افزایش هاله‌ها استفاده شده است.



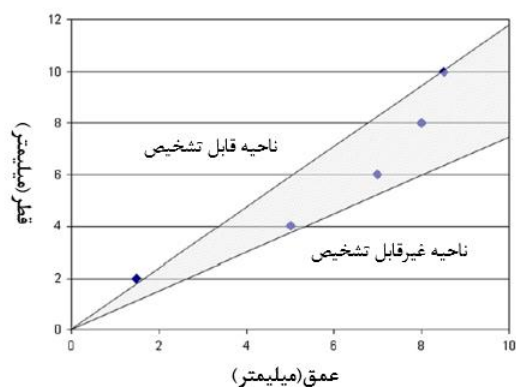
شکل ۶. الگوهای هاله‌ای برای نمونه آلومینیومی دارای سوراخ با عمق بحرانی. (a) $H_{2,5}DA$ سوراخ با قطر ۸ و عمق بحرانی ۲,۵ میلیمتر; (b) $H_{2,5}D$; (c) $H_{1,5}D$; (d) سه بار تکثیر هاله‌ها برای الگوی (c). [۱۳]

ناحیه‌ی قابل تشخیص برای نمونه آلومینیومی در شکل ۷ نشان داده شده است. با بررسی این ناحیه، نتایج زیر قابل ارائه است:

برای قطعه آلومینیومی با ضخامت ۳ میلیمتر، حداقل قطر برای سوراخ قابل تشخیص، باید حدود ۲,۵-۳ برابر عمق متناظر آن باشد. رابطه‌ی بین طول ترک و عمق بحرانی در شکل ۸ آمده است که نشان می‌دهد قابلیت تشخیص برش‌نگاری با تغییر در جهت برش تصاویر نسبت به جهت طولی ترک‌ها، تغییر می‌کند. با توجه به الگوهای هاله‌ای در شکل ۹ و زاویه‌ی برش‌ها، این نتیجه بدست می‌آید که زمانی که جهت تصاویر برشی عمود بر جهت ترک نباشند، در زاویه‌ی صفر و ۴۵ درجه، حساسیت تشخیص عیوب به بالاترین حد خود می‌رسد. جهت برش عمود بر جهت طولی ترک باعث یکسان شدن جهت الگوها و ترک می‌شود.

قابل تشخیص، در نظر گرفت. ناحیه‌ی غیر قابل تشخیص و ناحیه بین آنها نیز مشخص شده است. تنها سوراخ‌هایی با قطر و عمق متناظر با آن قابل شناسایی است که، در ناحیه‌ی قابل تشخیص قرار داشته باشند.

با بررسی جزئی تر این شکل به این نتیجه می‌رسیم که بیشترین قابلیت تشخیص عیوب برای یک سوراخ با قطر ثابت، در فاصله‌ی بین دو سطح نمونه می‌باشد. یعنی جایی که عمق عیوب به اندازه نصف ضخامت قطعه می‌رسد. هرچه عمق عیب زیاد و یا بیش از حد کم باشد، باعث ایجاد اختلال در الگوهای هاله‌ای می‌شود و تشخیص عیب از این الگوها با دشواری همراه می‌شود. برای نمونه‌های پی‌وی‌سی و پلی اتیلن با ضخامت ۱۰ میلیمتر، حداقل قطر برای سوراخ قابل تشخیص تقریباً برابر ۰,۸-۱,۳ برابر عمق متناظر آن می‌باشد.



شکل ۵. قابلیت برش‌نگاری در تشخیص عیوب روی نمونه پی‌وی‌سی. [۱۳]

برای مثال زمانی که عمق ۲ میلیمتر است، فقط سوراخ‌های با قطر بیشتر از ۲,۲ میلیمتر ($2 \times 1,1$) قابل تشخیص بودند.

بارگذاری در این نمونه‌ها از نوع حرارتی افزایش و کاهش دما بوده است و نتایج نشان می‌دهد که هر دو نوع بارگذاری مناسب می‌باشد و برای نمونه‌های پی‌وی‌سی و پلی اتیلن، نتایج یکسانی بدست آمد.

آزمایش بر روی نمونه‌های آلومینیومی نشان داد که تصاویر ضبط شده در حین افزایش درجه حرارت، خیلی واضح تر از تصاویر در حین کاهش درجه حرارت هستند. پس بارگذاری مناسب برای این نمونه‌ها از نوع افزایش درجه حرارت می‌باشد که حساسیت به تشخیص عیوب را بالا می‌برد. در مقایسه با نمونه‌های پلیمری، افزایش درجه حرارت برای آلومینیوم خیلی سریع و کوتاه می‌باشد. به این

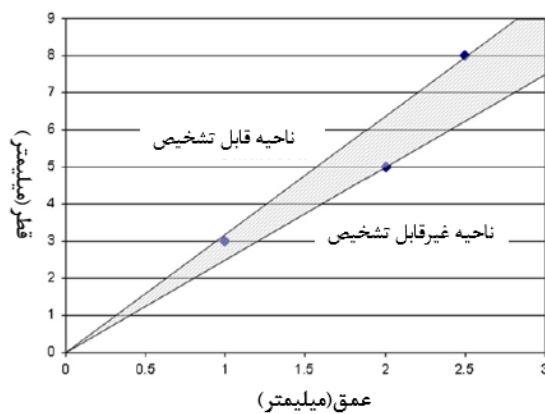
لیوبین و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از بارگذاری حرارتی و خلاء نسبی، قابلیت روش برش‌نگاری را روی نمونه‌های با ساختار لاستیک و فلز، مورد بررسی قرار دادند. [۱۴]

با وجود مقاومت و سختی کم، لاستیک دارای ویژگی‌های مهمی از جمله چسبندگی، مقاومت به سایش، مقاومت مکانیکی و تحمل رطوبت است. با استفاده از تکنولوژی اتصال، لاستیک می‌تواند به فلز به عنوان یک ساختار کامپوزیت که به طور گسترده در صنایع مدرن استفاده می‌شود، متصل شود. به طور کلی، روش‌های اتصال به دو دسته‌ی پیوند جوشی و پیوند غیر جوشی تقسیم می‌شوند. در این مقاله با روش جوشی، نمونه‌ای از لاستیک استایرن-بوتادین که نوعی الاستومر مصنوعی است با ضخامت ۲ میلی‌متر، به صفحه‌ی فولادی کم کربن متصل شد. سطح فلز و لاستیک با کاغذ سنباده ۱۲۰ پولیش زده شد تا صفحه‌های اکسید شده، جدا شوند. سپس سطح فلز با استون تمیز شد و سطح لاستیک به محلول ۵٪، تریکلروسیانوریک اسید برای کاهش دادن زبری سطح آغشته گردید. بعد از آماده سازی سطوح، دو صفحه توسط چسب اپوکسی با ضخامت تقریباً ۰,۲ میلی‌متر، به یکدیگر متصل شدند و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق نگهداری شدند. پس از آن به مدت ۳ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد حرارت دیدند.

در نمونه‌ی مورد نظر مطابق شکل (۱۰) عیوب مصنوعی ایجاد شد. عیوب اتصال، با قرار دادن ۲ لایه پلی‌تترافلورواتیلن با هندسه‌های مشخص شده در لایه‌ی چسب بین فلز و لاستیک، ایجاد شد. عیب دیگری نیز در نمونه‌ها با تغییر ضخامت چسب بین لایه‌ها از ۰,۲ تا ۰,۶ میلی‌متر ایجاد شد. ابعاد صفحه‌ی نمونه ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متر و ضخامت لاستیک و چسب و فلز به ترتیب ۲ و ۰,۲ و ۱,۵ میلی‌متر است.

در این مقاله از بارگذاری حرارتی به کمک دو نورافکن با توان ۲۰۰۰ وات در کنار سیستم برش‌نگاری و همچنین بارگذاری خلاء نسبی توسط محفظه‌ی خلاء، استفاده شد. در بارگذاری حرارتی، نمونه در فاصله‌ی حدود ۱,۲ میلی‌متر از دستگاه برش‌نگاری قرار گرفت و سطح لاستیک توسط پرتو لیزر با طول موج ۵۳۲ نانومتر شد. قبل از بارگذاری، تصویر مرجع توسط دوربین از سطح نمونه ضبط گردید. بعد از ۳ ثانیه بارگذاری، تغییر شکل خارج سطح در دستگاه

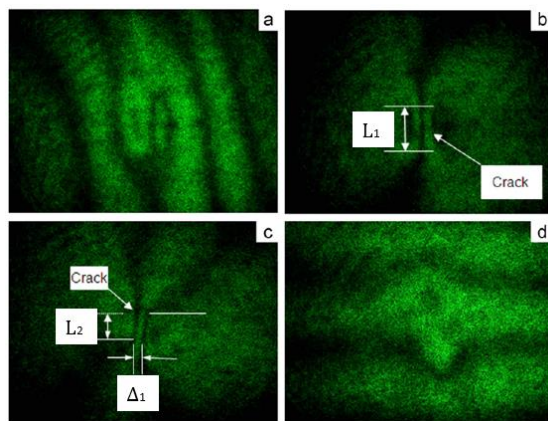
متناسب با نوع قرارگیری ترک در نمونه، باید زاویه‌ی برش مناسب انتخاب شود.



شکل ۷. قابلیت برش‌نگاری در تشخیص حفره نمونه آلومینیومی. [۱۳]



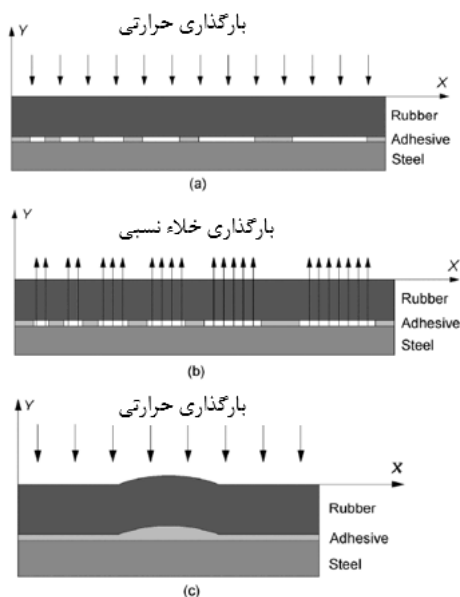
شکل ۸. قابلیت برش‌نگاری در تشخیص ترک نمونه آلومینیومی. [۱۳]



شکل ۹. الگوهای هاله‌ای برای نمونه آلومینیومی با ترک با طول ۱۵ و عمق ۱,۸ میلی‌متر؛ (a) افزایش درجه حرارت و زاویه برش عمود بر طول ترک؛ (b) کاهش درجه حرارت و زاویه برش عمود بر طول ترک؛ (c) کاهش درجه حرارت با زاویه برش ۴۵ درجه؛ (d) افزایش درجه حرارت با زاویه برش موازی. [۱۳]

۴-۲- ارزیابی قابلیت روش برش‌نگاری روی ساختارهای لاستیک و فلز

در حالت خلاء، از آنجا که فشار هوا داخل محفظه، زیر فشار اتمسفر استاندارد است، سطح داخل عیب‌ها تحت

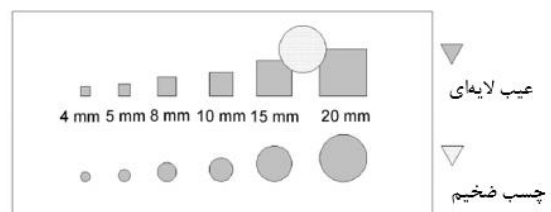


شکل ۱۱. شماتیک مدل اجزا محدود نمونه تحت بارگذاری‌های حرارتی و خلاء نسبی. (a) بارگذاری حرارتی روی عیب اتصال؛ (b) بارگذاری خلاء نسبی؛ (c) بارگذاری حرارتی روی قسمت دارای چسب ضخیم بین لایه‌ها. [۱۴]

توزیع فشار یکنواخت قرار گرفتند. پس فشار یکنواخت ۶ کیلوپاسکال به سطح عیب‌ها وارد شد. از آنجا که مدول الاستیک فولاد بسیار بیشتر از لاستیک است، تغییر شکل فولاد ناشی از فشار داخلی نادیده گرفته شد. در شرایط ضخامت غیر یکنواخت چسب، لایه‌ی چسب بین دو صفحه از ۰٫۲ تا ۰٫۶ میلی‌متر تغییر ضخامت می‌دهد که طبق شکل (c) ۱۱ در مدل اجزا محدود، بارگذاری خلاء نمی‌تواند هیچ فشار داخلی را در لایه‌ی چسب ایجاد کند در حالی که شار حرارتی ۷ وات بر متر مربع توانست باعث تغییر شکل خارجی نمونه شود.

تصاویر فازهای تداخلی برای بارگذاری حرارتی و خلاء نسبی روی نمونه، در شکل (۱۲) نشان داده شده است. این تصاویر فازی، مشتق جابه‌جایی خارج صفحه را نشان می‌دهند. با توجه به الگوهای فازی، همه‌ی ۱۲ عیب مربعی و دایره‌ای ایجاد شده به کمک هر دو بارگذاری حرارتی و خلاء نسبی تشخیص داده شد، اما فقط بارگذاری حرارتی، تغییر ضخامت چسب را نشان داد. با مقایسه‌ی شکل (a) ۱۲ و شکل (۱۰) می‌توان لایه‌ی چسب ضخیم بین دو صفحه را در الگوهای هاله‌ای مشاهده کرد. اندازه‌ی عیب‌های

نشان داده شد. دستگاه برش‌نگاری قادر است سطحی به اندازه‌ی ۲۲۰×۱۶۵ میلی‌متر را در یک مرحله بازرسی کند. مقدار برش تداخل‌گر مایکلسون به اندازه‌ی ۶۰ میکسل در جهت افقی تنظیم شد. در بارگذاری خلاء نسبی، نمونه در محفظه‌ی خلاء گذاشته شد و سطح لاستیک، توسط پرتو لیزر از میان پنجره شیشه‌ای شفاف، روشن شد. وقتی که پمپ خلاء، اختلاف فشاری به اندازه‌ی ۶ کیلوپاسکال نسبت به فشار محیط ایجاد کرد، تصویر مرجع و اولیه گرفته شد. سپس با کنترل کردن نرخ نشت فشار هوا تصویرهای بعدی گرفته و ذخیره شدند.



شکل ۱۰. نمونه مورد آزمایش و عیوب مصنوعی ایجاد شده در آن. [۱۴]

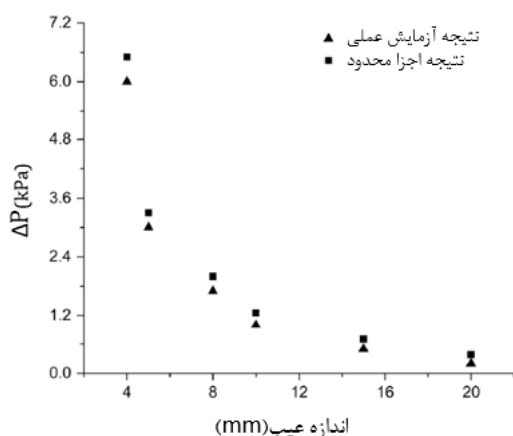
علاوه بر آزمایش‌های عملی، مدل اجزای محدود برای تخمین زدن تغییر شکل نمونه تحت بارگذاری حرارتی و خلاء نسبی، به کار گرفته شد. در بررسی‌های عددی، لاستیک، چسب و فولاد، همگن فرض گردید. دو نوع عیب شامل یکی عدم اتصال مناسب دو صفحه و دیگری ضخامت غیریکنواخت چسب در نظر گرفته شد. تمامی جزئیات موجود در نمونه طبق شکل (۱۰) مدل شد و مولفه‌های جابه‌جایی فولاد در کف نمونه به عنوان شرایط مرزی انتخاب گردید. شکل (۱۱) مدل اجزا محدود برای نمونه را تحت بارگذاری‌های حرارتی و خلاء نسبی و تغییر شکل سطح را نشان می‌دهد. در مدل بارگذاری حرارتی، شار حرارتی ۴ وات بر متر مربع بر سطح اعمال کردند سپس از نرم‌افزار آباکوس، مدول جابه‌جایی-حرارت برای تجزیه و تحلیل جابه‌جایی سطحی ناشی از انتقال حرارت مورد استفاده قرار گرفت.

فشار خلاء برای بدست آوردن تصاویر با کیفیت بالا بسیار مهم و لازم است. این نتیجه‌گیری بر اساس شکل (۱۴) که الگوهای حاشیه‌ای را در فشارهای مختلف نشان می‌دهد، بدست آمد.

ویژگی بارگذاری حرارتی این است که به راحتی اعمال می‌شود و یک حالت بارگذاری مهم در ارزیابی کیفیت ساختارهای متصل شده می‌باشد. در مقایسه با میدان جابه‌جایی ناشی از بارگذاری خلاء، توزیع جابه‌جایی در هر دو حالت یکسان است. تحت یک تابش گرمایی خاص، جابه‌جایی سطح خارجی عیب‌های بزرگ‌تر به میزان قابل توجهی بیشتر از عیب‌های کوچک می‌باشد.

جدول ۲. اندازه‌گیری ابعاد عیب‌ها [۱۴]

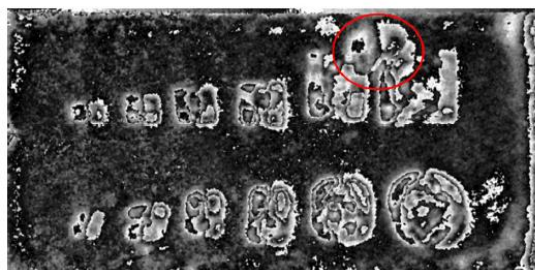
ابعاد عیب اندازه‌گیری شده توسط بارگذاری خلاء	ابعاد عیب اندازه‌گیری شده توسط بارگذاری حرارتی	ابعاد اصلی عیب‌های پیش‌ساخته	شماره عیب
mm	mm	mm	
۲۰٫۸۹	۱۹٫۲۵	۲۰	۱
۱۴٫۷۱	۱۴٫۵۲	۱۵	۲
۹٫۵۴	۱۰٫۳۶	۱۰	۳
۷٫۸۷	۷٫۰۵	۸	۴
۵٫۳۷	۵٫۸۶	۵	۵
۴٫۸۷	۴٫۵۰	۴	۶



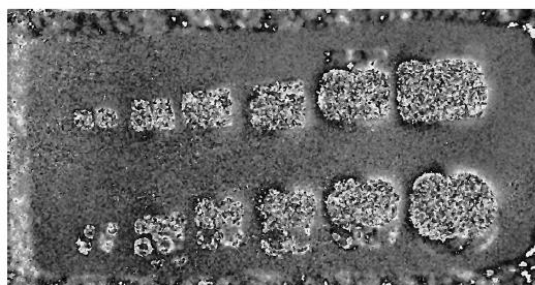
شکل ۱۳. مقایسه‌ی مقادیر فشار و نتایج تشخیص عیب‌ها توسط

مدل‌سازی اجزا محدود و آزمایش عملی. [۱۴]

اندازه‌گیری شده بعد از تحلیل الگوهای هاله‌ای در جدول ۲ نشان داده شده است. اگرچه خطایی بین اندازه‌ی ابعاد اصلی عیب‌ها و مقدار اندازه‌گیری شده وجود دارد، اما این مقدار کمتر از ۱ میلی‌متر است که دقت بالای دستگاه را نشان می‌دهد. در جدول (۲) ابعاد اصلی عیب‌ها و ابعاد اندازه‌گیری شده توسط بارگذاری حرارتی و خلاء قابل مقایسه است.



(a)



(b)

شکل ۱۲. تغییر الگوهای حاشیه‌ای در نمونه. (a) بارگذاری حرارتی؛ (b) بارگذاری خلاء. [۱۴]

همانطور که مشخص است، دو بارگذاری حرارتی و خلاء نسبی با اینکه تفاوت‌هایی در آشکار ساختن عیب و نوع تغییر شکل روی صفحه‌ی نمونه دارند، در تشخیص عیوب اتصالی موفق بودند. هرچه اندازه‌ی عیب بزرگ‌تر باشد، راحت‌تر و با اعمال نیروی کمتری آشکار می‌شود و برعکس، عیب‌های با ابعاد کوچک‌تر نیازمند اختلاف فشار درون محفظه و تغییرات گرمایی زیادتری می‌باشند.

به منظور بررسی رابطه بین اندازه عیب قابل تشخیص و اختلاف فشار مورد نیاز در محفظه‌ی خلاء، یک بررسی چند مرحله‌ای با حالت‌های مختلف خلا انجام شد. همچنین شبیه‌سازی عددی نیز بر اساس شکل (b) ۱۱ انجام گردید. تغییر اندازه عیب و شرایط بارگذاری که مشخص می‌کند کدام عیب‌ها به ترتیب آشکار شده‌اند، در شکل (۱۳) نشان داده شده است. زمانی که فشار خلاء به ۶ کیلوپاسکال رسید، کوچکترین عیب با اندازه‌ی ۴ میلی‌متر مشخص شد در حالی که الگوهای حاشیه‌ای برای بقیه‌ی عیب‌ها بسیار متراکم و غیر قابل تحلیل شد. از این نقطه‌نظر، تنظیم دقیق

مواد مرکب چوب-پلاستیک، قابلیت برش‌نگاری را در تشخیص عیب‌ها روی این مواد، مورد بررسی قرار دادند. [۱۵]

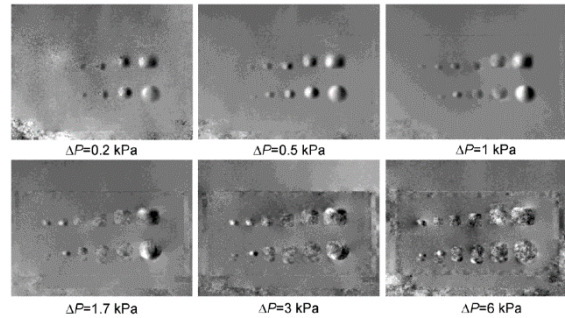
مواد مرکب چوب-پلاستیک یکی از پرکاربردترین نمونه‌های مواد مرکب می‌باشند که به طور گسترده در زمینه‌های مختلف در حال رشد هستند. این نمونه‌ها کاربرد بسیاری دارند که عمدتاً در بخش‌های ساختمانی هدف قرار می‌گیرند. کیفیت چسبندگی بین الیاف و ماتریس مهمترین عامل برای دستیابی به خواص مطلوب است. کیفیت ضعیف چسبندگی ممکن است منجر به وجود نقص در فصل مشترک چوب و پلیمرها شود که منبع اصلی ضعف نمونه است. بنابراین استفاده از روش‌های جدید و عملی برای بازرسی مواد مرکب به منظور کشف عیوب در ساختار آنها بسیار مهم به نظر می‌رسد.

روش‌های اصلی برای ساخت مواد مرکب چوب-پلاستیک، اکستروژن و قالب‌گیری تزریقی می‌باشد. اکستروژن که در آن اجزای چوب و پلیمر از طریق یک قیف با مواد افزودنی تغذیه می‌شوند، سپس ذوب می‌شوند و با استفاده از قالب شکل داده می‌شوند، از رایج‌ترین روش تولید است. همچنین از روش قالب‌گیری تزریقی برای شکل دادن چوب و قطعات پلاستیک (گرانول) مخلوط شده با هم جهت ساخت قسمت‌هایی استفاده می‌شود که نمی‌توان آنها را با اکستروژن تولید کرد.

مطابق شکل (۱۶) سه نمونه به روش قالب‌گیری تزریقی شامل ۱۰، ۲۵، ۴۵ درصد وزنی ذرات چوب و یک نمونه با کیفیت بالای چوب که با روش قالب‌گیری تزریقی امکان ساخت آن نبود، توسط روش اکستروژن تولید شد. سپس در پشت آن حفره ایجاد شد تا قابلیت روش برش‌نگاری برای تشخیص این حفره مشخص شود.

در این آزمایش، از پرتو لیزر ۱۰ میلی وات با طول موج ۶۳۲٫۸ نانومتر، دو آینه با پوشش آلومینیومی به قطر ۱ اینچ و ضخامت ۹ میلی‌متر، برای تابش دوجانبه، دو آینه با پوشش آلومینیوم به قطر ۲ اینچ و ضخامت ۴٫۵ میلی‌متر، دو لنز مسطح به قطر ۰٫۵ میلی‌متر برای پراکنده کردن نور لیزر استفاده شد. به عنوان ماده‌ی پلیمری در این نمونه از پلی اتیلن چگالی بالا و برای عنصر چوب از چوب بلوط سفید با اندازه‌ی دانه ۳۰-۴۰ مش استفاده شد.

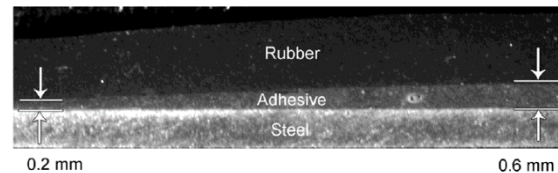
برای ضبط تصاویر برش‌نگاری با کیفیت بالاتر، ابتدا سطح نمونه با اسپری رنگ سفید پوشیده شد سپس نمونه‌ها بین



شکل ۱۴. الگوهای حاشیه‌ای عیب‌ها در فشارهای خلاء مختلف. [۱۴]

به این معنی که، یک بارگذاری حرارتی قوی‌تر برای تشخیص عیب با ابعاد کوچک‌تر مورد نیاز است. در طی آزمایش این نتیجه بدست آمد که، الگوهای هاله‌ای که توسط بارگذاری حرارتی به وجود آمده‌اند، با زمان تغییر می‌کنند. انتقال حرارت در مواد نمونه و انتقال حرارت بین هوای اطراف و نمونه تا زمان پایداری دمایی، باعث این تغییرات می‌شود. پس کیفیت الگوهای هاله‌ای در بارگذاری حرارتی به اندازه‌ی الگوهای حاصل از بارگذاری خلاء، قابل اعتماد نیستند.

علاوه بر استفاده‌ی آسان از بارگذاری حرارتی، این روش برای تشخیص حفره‌ها و ترک‌هایی که راه به در هستند و روی سطح ایجاد مسیره‌های باز می‌کنند، مناسب است. در این شرایط بارگذاری خلاء نمی‌تواند باعث جابه‌جایی خارج صفحه شود مگر اینکه اختلاف فشار هوای بین سطح نمونه و داخل آن به سرعت صفر شود. علاوه بر این، تنها بارگذاری حرارتی توانست ضخامت غیریکنواخت چسب بین فولاد و لاستیک را تشخیص دهد، شکل (۱۵) نشان دهنده‌ی تغییر ضخامت چسب از ۰٫۲ تا ۰٫۶ میلی‌متر در بین دو لایه می‌باشد.

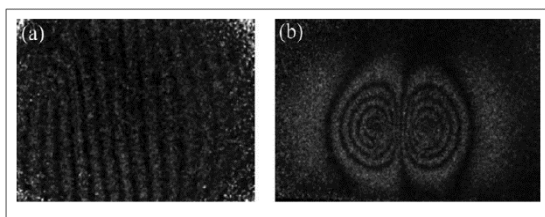


شکل ۱۵. مقطع عرضی ساختار لاستیک و فلز با ضخامت چسب. [۱۴]

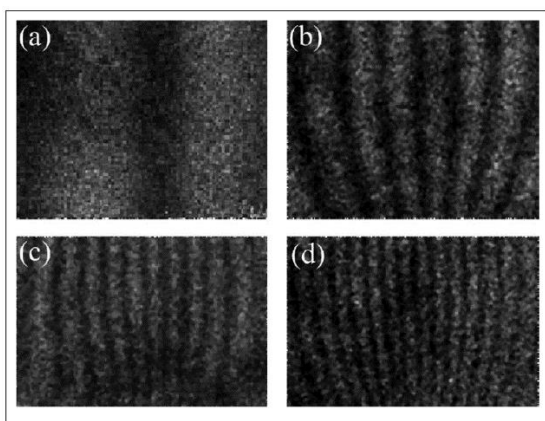
۳-۴- به کارگیری برش‌نگاری در تشخیص عیوب در مواد مرکب چوب-پلاستیک

بَرَموز و همکاران در سال ۲۰۱۴ با استفاده از بارگذاری حرارتی و ایجاد عیب‌های مصنوعی در نمونه‌هایی از جنس

باربرداری نشان می‌دهد. این الگوها عدم وجود عیب در نمونه را نشان می‌دهند.



شکل ۱۷. مقایسه الگوهای هاله‌ای برش‌نگاری نمونه‌ی ۶۰ درصد وزنی چوب. (a) نمونه سالم؛ (b) نمونه دارای حفره. [۱۵]



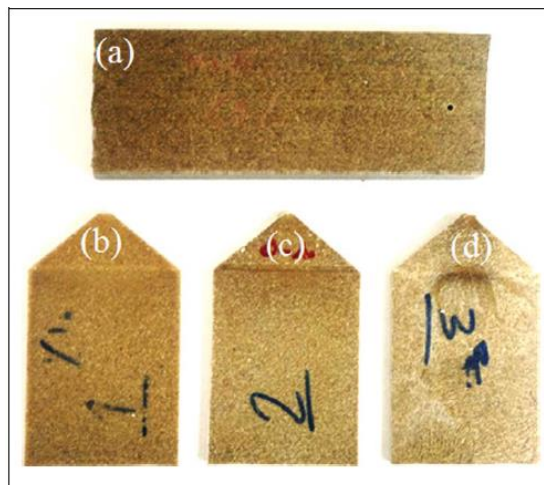
شکل ۱۸. (a) تا (d) الگوهای هاله‌ای موازی حاصل از بازرسی نمونه‌ی ۱۰ درصد وزنی چوب تولید شده به روش قالب‌گیری تزریقی به ترتیب ۱ تا ۴ ثانیه بعد از باربرداری. [۱۵]

خطوط عمودی سیاه در زمان‌های مختلف باربرداری ثابت باقی ماند و بدون هیچگونه انحراف، فقط به هم نزدیک شدند. حجم پایین چوب موجود در این نمونه می‌تواند نشانه‌ی سالم بودن قطعه طبق دلایل روبرو باشد: (۱) تسهیل جریان مواد حاصل از لزجت پایین مواد مرکب در حین تولید و (۲) پراکندگی خوب چوب در ماتریس پلیمری.

شکل (۱۹) نتایج حاصل از ارزیابی برش‌نگاری روی نمونه با ۲۵ درصد حجمی چوب را نشان می‌دهد که این تصاویر ۲، ۴ و ۶ ثانیه بعد از باربرداری ضبط شدند. الگوهای هاله‌ای نشان می‌دهد که تعداد خطوط تیره‌ی عمودی با افزایش زمان، اضافه می‌شود. با این حال، انحراف کوچک خطوط تیره‌ی عمودی با طول تقریبی ۲ میلی‌متر مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از تراکم ذرات چوبی باشد.

با مطالعه‌ی جزئی‌تر نتایج، این نتیجه بدست می‌آید که حجم بالای مواد پرکننده در نمونه‌های مواد مرکب باعث کاهش کیفیت انتشار ذرات در آن می‌شود. شکل‌های (۲۰) و (۲۱) الگوهای هاله‌ای حاصل از بررسی برش‌نگاری روی

یک یا دو فک دستگاه کشش ثابت شدند. در قدم بعدی، بارگذاری حرارتی توسط تابش لامپ فلورسنت که در جلوی نمونه قرار داده شد، اعمال گردید تا منجر به ایجاد کرنش‌های کوچک روی سطح نمونه شود. در این آزمایش، شرایط محدود کننده در دوطرف نمونه‌ها ثابت می‌باشد اما برای نمونه ۴۰ درصد وزنی چوب تولید شده توسط قالب‌گیری تزریقی، شرایط ثابت یکطرفه مورد بررسی گرفت.



شکل ۱۶. نمونه‌های ساخته شده. (a) اکستروژن شامل ۶۰ درصد وزنی ذرات چوبی؛ (b) تا (d) قالب‌گیری تزریقی شامل به ترتیب ۱۰، ۲۵، ۴۵ درصد وزنی ذرات چوبی. [۱۵]

در ابتدا نمونه‌ی تولید شده توسط روش اکستروژن با ۶۰ درصد وزنی چوب برای تعیین قابلیت تشخیص عیب برش‌نگاری مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل (۱۷) مشخص است، نمونه‌ی (a) بدون عیب می‌باشد و الگوهای هاله‌ای موازی تشکیل شده است. در نمونه‌ی (b) سوراخی به قطر ۲ میلی‌متر در یک طرف آن ایجاد شده است. الگوهای هاله‌ای این نمونه، وجود عیب را مشخص می‌کند. با توجه به اینکه در قبل آزمایش‌هایی بر روی مواد پلیمری انجام شده بود و روش برش‌نگاری کاملاً در تشخیص عیب‌ها موفق عمل کرده بود، به این نتیجه می‌رسیم که الیاف چوب هیچگونه محدودیتی برای استفاده از روش برش‌نگاری جهت بازرسی مواد مرکب ایجاد نمی‌کند.

در مرحله‌ی بعدی، برش‌نگاری برای تشخیص عیب‌های احتمالی روی نمونه‌های تولید شده از طریق قالب‌گیری تزریقی، مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱۸) الگوهای هاله‌ای نمونه‌ی با ۱۰ درصد وزنی چوب را بعد از ۱ تا ۴ ثانیه

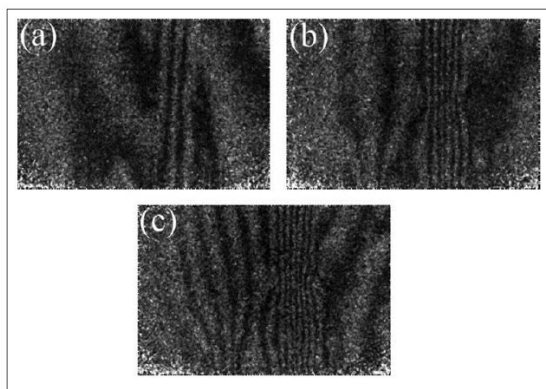
زیر سطح نمونه ماده مرکب را نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی دقت نتایج بدست آمده، آزمایش دیگری که نمونه تنها از یک طرف محدود است با همان شرایط بارگذاری قبلی، انجام شد که در شکل (۲۱) الگوهای هاله‌ای آن مشخص است.

نتایج کاملاً مشخص است و وجود عیب در لایه‌های زیر سطح نمونه ماده مرکب را نشان می‌دهد. خطوط تیره‌ی درهم شکسته، فروپاشی ساختار ماده مرکب در زیر سطح را نشان می‌دهد که منجر به انحراف نور منعکس شده از سطح نمونه می‌شود. طول قسمت انحرافی حدود ۷ میلی‌متر به بالا است. دلایل این نقص‌ها می‌تواند ناشی از موارد زیر باشد:

(۱) ماده مرکب با حجم بالای مواد پرکننده باعث بالا رفتن لزجت می‌شود که تولید و قالب‌گیری آن را دشوارتر می‌کند
(۲) مقدار بیشتری از ذرات چوب، تراکم اجزای چوب را در ماتریس افزایش می‌دهد که باعث ایجاد ترک و از هم گسیختگی در ساختار مواد مرکب می‌شود.

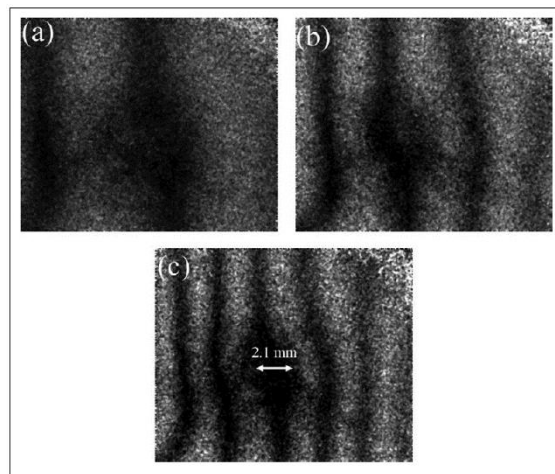
(۳) چسبندگی ضعیف اجزای چوب به یکدیگر ممکن است باعث اتصال ضعیف بین چوب و ماتریس پلیمری شود.

پس روش برش‌نگاری در این نوع مواد مرکب نیز نتیجه‌های بسیار قابل قبولی از جمله اشکال در ساختار تولیدی مواد و وجود حفره در آن را در اختیار گذاشت که می‌توان با بهره‌گیری از آن به بهترین بازرسی از سطح نمونه دست یافت.



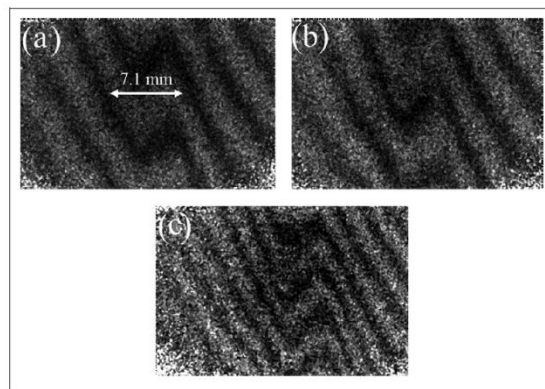
شکل ۲۱. (a) تا (c) الگوهای هاله‌ای حاصل از بازرسی نمونه با ۴۰ درصد حجمی چوب، به ترتیب ۱، ۲ و ۳ ثانیه بعد از باربرداری، یک طرف نمونه محدود شده است. [۱۵]

نمونه‌ی با ۴۰ درصد حجمی چوب، ۱ تا ۳ ثانیه بعد از باربرداری را نشان می‌دهد با این تفاوت که در شکل (۲۱) نمونه از دو طرف ولی در شکل (۲۱) نمونه فقط از یک طرف توسط فک دستگاه کشش محدود شد. در شکل (۲۰) یک الگوی ناهمگن با شکل‌گیری خطوط تیره مشاهده می‌شود.



شکل ۲۰. (a) تا (c) الگوهای هاله‌ای حاصل از بازرسی نمونه‌ی ۲۵ درصد حجمی چوب تولید شده به روش قالب‌گیری تزریقی به ترتیب ۲، ۴ و ۶ ثانیه بعد از باربرداری. [۱۵]

علاوه‌براین فاصله‌ی بین خطوط برابر نیستند و فقط تعداد کمی از آنها از الگوی موازی مستقیم، منحرف شدند که عیب شدیدی را در نمونه نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی دقت نتایج بدست آمده، آزمایش دیگری که نمونه تنها از یک طرف محدود است با همان شرایط بارگذاری قبلی، انجام شد که در شکل (۲۱) الگوهای هاله‌ای آن مشخص است. نتایج کاملاً مشخص است و وجود عیب در لایه‌های



شکل ۲۰. (a) تا (c) الگوهای هاله‌ای حاصل از بازرسی نمونه با ۴۰ درصد حجمی چوب، به ترتیب ۱، ۲ و ۳ ثانیه بعد از باربرداری، دو طرف نمونه محدود شده است. [۱۵]

[4] Hung, Y.Y., (1999). Applications of digital shearography for testing of composite structures, *Composites Part B*, 30, pp.765-773.

[5] Gryzgoridis, J., (2012). Laser based nondestructive inspection techniques, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 31, pp. 295-302.

[6] Newman, J.W., (2008). Aerospace NDT with advanced laser shearography, 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, Oct 25-28

[7] Jia, S., Hong, E., Katz, R., (2012). Nondestructive Testing of Ultrasonic Welding Joints Using Shearography Technique, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 134, pp. 034502.

[8] Sujatha N., Murukeshan V. M., Rajendran S., Ong L. S., Seah L. K., (2005), Nondestructive inspection of inner surfaces of technical cavities using digital speckle shearography, *Nondestructive testing and evaluation*, 20, pp.25-34.

[9] Akbari, D., Soltani, N., (2013), Investigation of Loading Parameters in Detection of Internal Cracks of Composite Material with Digital Shearography, *World Applied Sciences Journal*, 21, pp. 526-535.

[10] Zhang, L., Liu, H., Guo, S., Chen, Y. F., (2018), Acoustic shearography for crack detection in metallic plates, *Smart Materials and Structures*, 27,085018 (10pp)

[۱۱] اکبری، د.، سلطانی، ن.، رشادی، ف.، (۱۳۹۲) استفاده از روش برش‌نگاری دیجیتال در انجام آزمون های غیرمخرب به کمک بارگذاری حرارتی، *مجله علمی پژوهشی مکانیک مدرس*، جلد. ۱۳، شماره. ۴، ص. ۳۶-۴۵

[12] Francis, D., Tatam, R.P., Groves, R.M., (2010). Shearography technology and applications: a review, *Measurement science and technology*, 21, pp. 1-29.

[13] Liu, Z.W., Gao, J.X., Xie, H.M., Wallace, P., (2011). NDT capability of digital shearography for different materials, *Optics and Lasers in Engineering*, 49, pp. 1462-1469.

[14] Liu, B., Guo, X.M., Qi, G.J., Zhang, D.S., (2015). Quality evaluation of rubber-to-metal bonded structures based on shearography, *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 58, pp. 1-8.

[15] Barmouz, M., Behravesh, A.H., Reshadi, F., Soltani, N., (2014). Assessment of defect detection in wood-plastic composites via shearography method *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, pp. 1-9.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش برش‌نگاری دیجیتال که زیرمجموعه‌ای از روش‌های نوین در بازرسی‌های غیرمخرب است بررسی شد و نحوه‌ی کار و تجهیزات به کاررفته در آن شرح داده شد. با توجه به این که این روش غیرتماسی است و مشتق جابه‌جایی سطح را محاسبه می‌کند، با بررسی چند پژوهش انجام شده به قابلیت بالای برش‌نگاری در تشخیص عیوب در قطعات به‌خصوص مواد مرکب، پرداخته شد. این روش هم در نمونه‌های فلزی و هم نمونه‌های پلیمری قابلیت بالایی را نشان داده است و می‌توان نمونه‌های مواد مرکب با ضخامت کم را نیز به راحتی با بارگذاری مناسب روی آن‌ها، بازرسی کرد.

علاوه براین، چون ترک یکی از مهمترین عیب‌های ایجاد شده در نمونه‌ها است و شناسایی ترک‌ها توسط روش‌های بازرسی دیگر، بسیار دشوار است، برش‌نگاری می‌تواند به درستی آن‌ها را تشخیص دهد. از این رو پیشنهاد می‌شود که از این روش به طور گسترده در شناسایی ترک‌ها در قطعات استفاده شود.

۶- منابع

[1] Steinchen, W., Kupfer, G., Yang, L., Mackel, P., (1998). Nondestructive testing of aerospace composite materials using digital shearography, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 212, pp.1-21.

[2] Akbari D, (2012). "Development and Application of Non Destructive Testing of Digital Shearography in Evaluation of Defects in Composite Materials". *PhD Thesis*, University of Tehran, Iran. (in Persian)

[3] Hung, Y.Y., Ho, H.P., (2005). Shearography: An optical measurement technique and applications, *Materials Science and Engineering*, 49, pp. 61-87.

Investigation of Digital Shearography for Defect Detection in Different Materials

Farzad Banakar^{1*}, Davood Akbari²

¹Msc Student, Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Iran, Tehran

²Assistant Professor, Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Iran, Tehran

* f_banakar@yahoo.com

Abstract:

The shearography method is one of non-contact and full-field method for Nondestructive testing of parts and sets. In this method the displacement gradient is directly measured. After processing the image, the surface fringe patterns are earned. It is used mainly in detecting surface and sub-surface defects of parts. Other applications include strain measurement, characterization of material properties, evaluation of residual stresses, leakage detection, structural vibration studies and three - dimensional measurements. Due to the measurement of displacement derivatives and not sensitive to the vibrations of the environment, in addition to experimental environments, it has a wide application in industrial environments, which makes this method discriminate with other optical methods. This method is used mostly in composite and metal components for defect detection. In this paper, we study techniques, equipment, method of operation, image processing, type of loading according to the materials and type of defect with emphasis on some practical researches in this regard.

Keywords: Shearography, Nondestructive test, NDT, Strain measurement

پیاده‌سازی سیستم تصویربرداری فراصوتی با استفاده از آرایه‌های فازی

وحید حمیتی واقف^۱، مهدی بکرانی^۲

^۱ استادیار، مهندسی الکترونیک، پژوهشگاه نیرو

^۲ استادیار، مهندسی الکترونیک، دانشگاه صنعتی قم

* vvaghef@nri.ac.ir

چکیده

تصویربرداری فراصوتی با آرایه‌های فازی یکی از آزمون‌های بسیار مهم در مجموعه آزمون‌های غیرمخرب است. در این مقاله سیستم تصویربرداری فراصوتی با استفاده از آرایه‌های فازی طراحی و ساخته شده است. پیاده‌سازی با استفاده از مدارهای مجتمع انجام شده است که سبب کیفیت بالاتر تصویر، نویز کمتر، قیمت تمام شده کمتر و ابعاد و وزن کمتر نسبت به اغلب سیستم‌های فعلی، می‌شود. سیستم ساخته شده امکان اتصال به هر نوع پروب با کانکتور استاندارد را دارا بوده و حداکثر تا ۱۶ المان را با نرخ نمونه‌برداری 40MHz پشتیبانی می‌نماید و قابلیت ارتقاء برای به کارگیری تعداد المان‌های بیشتر را نیز دارد. تصویربرداری نیز با روش تمرکز کامل در آن انجام می‌شود و بنابراین تصاویر آن دارای نویز کمتر و تفکیک بهتر نسبت به تصاویر معمول آرایه فازی می‌باشد. قابلیت حمل و جابجایی آسان و امکان توسعه سیستم به منظور به کارگیری آن برای انواع آزمون‌های غیرمخرب، همراه با هزینه تمام شده بسیار کمتر نسبت به نمونه خارجی از ویژگی‌های مهم این تحقیق می‌باشد. در نتیجه آزمایش‌های انجام شده، این دستگاه سه حفره به قطرهای ۰٫۸، ۰٫۶ و ۰٫۳ میلی‌متر را به خوبی تشخیص داده و تصویر با کیفیت از آنها ارائه می‌دهد.

واژگان کلیدی: تصویربرداری فراصوتی، آرایه‌های فازی آلتراسونیک، روبش نمای (A-scan) A، روبش نمای (B-scan) B، روش تمرکز کامل

۱- مقدمه

مانند رادیوگرافی دیجیتالی و کامپیوتری و توموگرافی، تصویربرداری فراصوتی با آرایه‌های فازی و ... وجود دارد [۱][۲][۳]. از میان روش‌های مذکور، دو روش رادیوگرافی و آزمون‌های فراصوتی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در روش رادیوگرافی با تاباندن اشعه X بر قطعه، اثری بر روی فیلم رادیوگرافی ایجاد می‌شود که در نهایت منجر به تصویر رادیوگرافی می‌شود. در کنار هزینه نسبتاً اندک، دیگر مزیت مهم این روش، ارائه تصویر کامل از داخل قطعه است. لیکن چندین ایراد عملیاتی به آن وارد است. نخست آنکه به دلیل به کارگیری اشعه X در این روش، باید محوطه مورد استفاده تا شعاع مشخصی از حضور سایر کارکنان تخلیه شود و بنابراین سبب اختلال در سایر فعالیت‌های داخل آن محوطه می‌شود. دوم آنکه عملیات ظهور فیلم رادیوگرافی و اخذ تصویر آن، بلافاصله انجام نمی‌شود و معمولاً انجام آن در محل انجام آزمون امکان‌پذیر نیست. بنابراین وقفه قابل توجهی از هنگام آغاز آزمون تا تشکیل

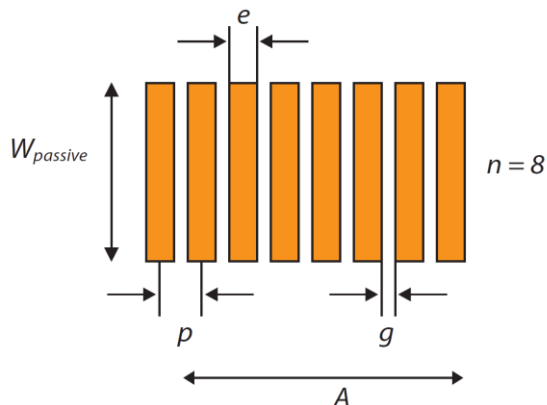
آزمون‌های غیرمخرب نقش مهمی در صنایع نیروگاهی، نفت، گاز، پتروشیمی، پالایشگاهی، آب و فاضلاب، ریلی، هسته‌ای، بتون، هوایی، نظامی، مهندسی پزشکی و ... دارند. از بین انواع آزمون‌های غیرمخرب، آزمون‌های فراصوتی و از میان آنها نیز تصویربرداری فراصوتی با استفاده از آرایه‌های فازی، بیشترین توجه را در صنعت به خود جلب کرده‌اند. امکان مشاهده عمق قطعه، عدم نیاز به هر نوع ابزارهای جانبی، سهولت استفاده و مستندسازی و امکان به کارگیری تقریباً بلافاصله پس از عملیات اصلی مانند جوشکاری، از مهمترین ویژگی‌های این روش است. ضمن آنکه با استفاده از این روش، می‌توان تصاویر سه بعدی از داخل قطعه نیز تهیه نمود و تقریباً کلیه اجزای داخلی قطعه را بدون کوچکترین آسیب به آن مورد بررسی و ارزیابی قرار داد. برای تصویربرداری از داخل قطعات روش‌های مختلفی مانند برش‌گرافی^۱، ترموگرافی، رادیوگرافی و مشتقات آن

¹ Shearography

به منظور ارزیابی جوش لوله‌های واتروال بویلر انجام شده- است، ارائه می‌شود. سیستم ساخته شده از روش تمرکز کامل جهت تشکیل تصویر بهره می‌برد و از این روی کیفیت تصاویر آن نسبت به تصاویر معمول آرایه‌های فازی فراصوتی نويز کمتری دارد.

۲- تصویربرداری فراصوتی با استفاده از آرایه‌های فازی

۱-۲- پروب آرایه فازی فراصوتی خطی
 پروب آرایه فازی فراصوتی دارای انواع بسیار زیادی است. در این تحقیق از یک پروب آرایه فازی خطی استفاده شده- است که در آن تعداد n المان پیزوالکتریک در گام p و ارتفاع W از یکدیگر قرار گرفته‌اند. شکل ۱ نمایی از این پروب را نشان می‌دهد.



شکل ۱: مشخصات کلی یک پروب آرایه فازی آلتراسونیک

۲-۲- نحوه تشکیل تصویر و روبش الکترونیکی در تصویربرداری فراصوتی، جهت اخذ تصویر، یک پالس به یک المان یا تعدادی از آنها یا همه المان‌های پروب اعمال می‌شود. معمولاً دوره تناوب این پالس برابر نصف دوره تناوب فرکانس پروب است تا بیشترین تحریک برای پروب اتفاق افتد. بسته به اینکه چه تعداد المان تحریک شده باشد، انواع روش‌های تصویربرداری وجود دارند [۵][۶][۷]. برخی از این روش‌ها موجب بهبود کیفیت تصویر شده و برخی دیگر سبب بهبود سرعت تشکیل تصویر می‌شود ولی تقریباً همه آنها باید بین سرعت تشکیل تصویر و کیفیت آن مصالحه کنند [۸][۹].

بر اثر تحریک المان‌های آرایه، امواج فراصوتی تولید شده و در محیط قطعه منتشر شده و پس از بازتاب از محیط داخل قطعه، بازتاب می‌شوند. این بازتاب‌ها توسط کلیه المان‌ها دریافت می‌شوند و پس از تبدیل به سیگنال‌های

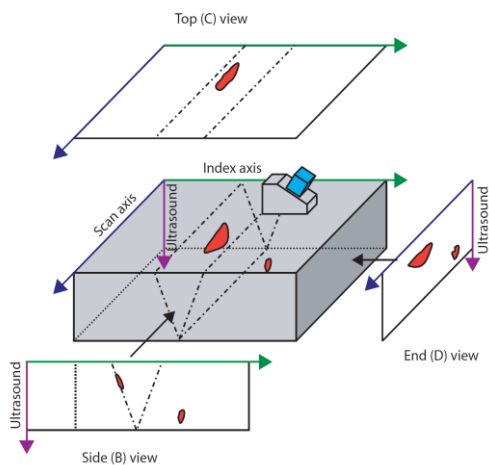
تصویر و در نهایت تفسیر آن به وجود می‌آید. سوم آنکه اگر فیلم اخذ شده به هر دلیل معیوب باشد، تا زمان ظهور تصویر مشخص نمی‌شود و بنابراین در صورت وجود هر گونه ایراد، مجدداً باید کل فرآیند تکرار شود. در نهایت آنکه مستندسازی این فرآیند نیز به صورت رایانه‌ای امکان‌پذیر نیست و باید حتماً در قالب همان فیلم‌های رادیوگرافی صورت گیرد. بنابراین، چنانچه نیاز به اخذ مشاوره از سایر متخصصان آن حوزه باشد، تنها راه حل مراجعه حضوری ایشان است. بنابراین از مجموعه ایرادات فوق، نتیجه می‌شود که در روش رادیوگرافی، امکان انجام آزمون و اصلاح آن معمولاً به طور همزمان وجود ندارد و اغلب موجب اختلال در عملکرد عادی مجموعه نیز می‌شود که در برخی موارد موجب تحمیل هزینه و صرف زمان قابل توجه می‌شود.

روش دوم تصویربرداری با استفاده از آرایه‌های فازی فراصوتی (PAUT) است. این روش نسبت به روش رادیوگرافی جدیدتر است. در این روش یک پروب آرایه فازی فراصوتی مورد استفاده قرار گرفته و با ارسال و دریافت امواج فراصوتی، تصویر داخل قطعه را به دست می‌دهد. بنابراین، اولاً هیچ یک از مخاطرات استفاده از اشعه X را ندارد و نیازی به تخلیه محوطه از حضور سایر کارکنان نیست. ثانیاً تصویر بلافاصله به دست می‌آید و در رایانه دستگاه ذخیره می‌شود و لذا مفسر آزمون بلافاصله می‌تواند آن را ارزیابی نماید و در صورت وجود هر گونه ایراد در تصویر، بلافاصله نسبت به اخذ تصویری دیگر اقدام نماید. با توجه به عدم نیاز به استفاده از فیلم‌های رادیوگرافی، هزینه‌ای نیز از این جهت متوجه سیستم نمی‌باشد. ضمن آنکه کلیه تصاویر در حافظه دستگاه به صورت رایانه‌ای ذخیره می‌شوند و نیاز به مستندسازی فیزیکی مرتفع شده و امکان استفاده از مشاوران خبره به صورت دور نیز میسر می‌شود. معمولاً دستگاه‌های آرایه فازی نسبت به دستگاه‌های رادیوگرافی کوچکتر و سبکتر هستند و بنابراین استفاده و حمل و آنها آسانتر از روش رادیوگرافی می‌باشد.

در این زمینه پیشتر ساخت سیستم روبشگر در داخل کشور گزارش شده‌است که اگرچه تصویر روبش B اخذ شده‌است، لیکن تنها روبشگر مکانیکی آن ساخته شده‌است و اجزای الکترونیکی به صورت آماده از قبل مورد استفاده قرار گرفته‌است [۴].

در این مقاله طراحی و ساخت یک سیستم تصویربرداری مبتنی بر آرایه‌های فازی که با موفقیت در پژوهشگاه نیرو و

تکرار این فرآیند، مجموعه‌ای از تصاویر B-scan اخذ می‌شود، که به نمای بالا یا C-scan منجر می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳: انواع تصاویر آرایه فازی آلتراسونیک [۱۰]

۳- سخت‌افزار و نرم‌افزار

در این بخش، روش به کار رفته جهت اخذ تصاویر و سخت‌افزار و نرم‌افزار پیاده‌سازی شده، تشریح می‌شوند.

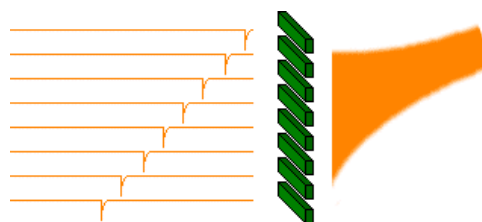
۳-۱- روش تمرکز کامل

بر اساس مطالب ارائه شده در بخش پیشین، اگر فرض شود که آرایه فازی دارای n المان است و در هر بار تشکیل تصویر، همه آنها در عملیات ارسال و دریافت مشارکت دارند، برای هر نقطه از فضای داخل قطعه، باید n تاخیر و n عملیات جمع اعمال شود. چنانچه فضای داخل قطعه نیز به k نقطه تقسیم شده‌باشد، در مجموع نیاز به nk عملیات تاخیر و جمع است که حجم قابل توجهی از پردازش را شامل می‌شود و روش متداول تشکیل تصویر فراصوتی با استفاده از آرایه فازی است. چون در این روش در هر بار تشکیل تصویر، n روبش A گردآوری می‌شود و پس از تعیین روشنایی نقطه مورد نظر، دیگر نیازی به آن حافظه نیست، بنابراین حافظه مورد نیاز برای نگهداری روبش‌های A و انجام پردازش، با n متناسب خواهد بود.

با این حال، روشی جدید در این زمینه معرفی شده‌است که در آن به جای تکرار عملیات ارسال و دریافت برای هر نقطه، این عملیات فقط یک بار برای کل فضای داخل قطعه انجام می‌شود و سپس تصویر آن تشکیل می‌شود [۱۵-۱۲]. در این روش که با عنوان روش تمرکز کامل مشهور است، هر بار فقط یک المان آرایه تحریک می‌شود ولی همه المان‌ها در عملیات دریافت حضور دارند. بنابراین در هر بار تحریک یک المان، اطلاعات n روبش A ، دریافت می‌شود.

الکترونیکی دیجیتالی توسط برنامه مربوط مورد پردازش قرار گرفته و تصویر را تشکیل می‌دهند.

یکی از ویژگی‌های مهم تصویربرداری فراصوتی با پروب آرایه فازی آن است که بدون نیاز به جابجایی فیزیکی و تنها با اعمال تاخیر در سیگنال اعمالی به مدارات الکترونیکی، می‌توان از آن تصویر اخذ نمود [۱۰][۱۱]. بدین منظور، کافی است تا در هنگام تحریک المان‌های آرایه فازی، به نحوی پالس ارسالی آنها با یکدیگر تاخیر داشته باشند که همه آنها به طور همزمان در یک نقطه متمرکز گردند و اصلاحاً به آن قانون کانونی (Focal law) اطلاق می‌شود (شکل ۲) [۱۰][۱۱]. نکته مهم آن است که می‌توان علاوه بر ایجاد تمرکز، با استفاده از تاخیرهای الکترونیکی مذکور، تمرکز را در هر نقطه دلخواهی از محیط مد نظر ایجاد نمود که اصطلاحاً به آن روبش الکترونیکی گفته می‌شود (شکل ۲).

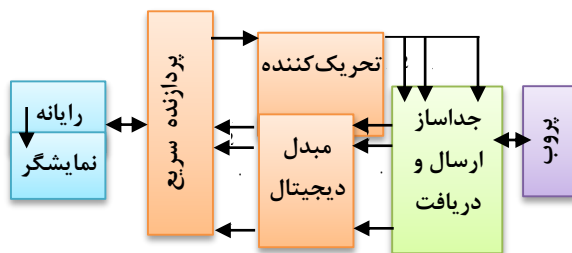


شکل ۲: اعمال تاخیر الکترونیکی به آرایه فازی جهت تمرکز امواج آن [۱۰]

۳-۲- انواع نما و تصاویر فراصوتی

پالس ارسالی به هر المان در بازگشت نیز به صورت پالس دریافت شده و ذخیره می‌شود. به این ترتیب سیگنال دریافتی، در واقع یک شکل موج است که محور افقی در آن از جنس زمان است. با توجه به اینکه سرعت انتشار امواج صوتی در قطعه مشخص هستند، می‌توان محور افقی را از نوع فاصله مکانی در نظر گرفت. بنابراین شکل موجی حاصل می‌شود که به آن نمای روبش A یا A-scan گفته می‌شود. بسته به اینکه چه تعداد المان در عملیات ارسال و دریافت در هر بار تشکیل تصویر فعال شوند، برای هر نقطه از فضای داخل قطعه، تعدادی A-scan اخذ می‌شود. این نماهای روبش A ابتدا بسته به فاصله از نقطه مورد بررسی، به میزان کافی تاخیر می‌یابند و سپس با یکدیگر جمع می‌شوند تا شدت روشنایی تصویر برای آن نقطه به دست آید. تکرار این فرآیند برای همه نقاط داخل فضای قطعه، منجر به تشکیل تصویری جانبی از قطعه می‌شود که به آن نمای روبش B و یا B-scan گفته می‌شود (شکل ۳). با حرکت دادن پروب و

480Mbps می‌شود. به علاوه مجموعه دارای ۱۶ المان می‌باشد که نرخ داده خروجی را به 7.68Gbps می‌رساند. این نرخ بالای انتقال داده، سبب می‌شود تا مجموعه نیازمند یک پردازنده سریع باشد. پردازنده سریع داده‌ها را گردآوری کرده و برخی عملیات اولیه را بر روی آنها انجام می‌دهد. سپس این اطلاعات به رایانه ارسال شده و با اعمال تاخیرها بر اساس الگوریتم روش تمرکز کامل، تصویر تشکیل شده و در نمایشگر نشان داده می‌شود. بر این اساس، بلوک دیاگرام بخش الکترونیک در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل، ابتدا تاخیرها در رایانه محاسبه شده و به قطعه تحریک‌کننده منتقل می‌شوند و سپس به پروب اعمال می‌شوند. با توجه به آنکه مسیر ارسال و دریافت سیگنال در پروب یکسان است، قطعه جداساز، مسیر ارسال و دریافت را از یکدیگر مجزا می‌کند. سپس سیگنال دریافتی از پروب وارد مبدل دیجیتال شده و به معادل دیجیتالی تبدیل شده و به پردازنده سریع منتقل می‌شود. در شکل ۵ نمایی از برد الکترونیک پیاده‌سازی شده نشان داده شده است.



شکل ۴: بلوک دیاگرام بخش الکترونیک



شکل ۵: نمایی از بردهای الکترونیکی ساخته شده در پژوهشگاه نیرو

۳-۳- برنامه نرم‌افزاری

برنامه نرم‌افزاری وظیفه دریافت داده‌های مربوط به آرایه فازی، محاسبه تاخیرها، اعمال آنها و تشکیل تصویر را بر

با تکرار این فرآیند برای همه المان‌ها، در مجموع n^2 روبش A دریافت می‌شود که حافظه‌ای بسیار بزرگتر و n^2 برابر روش رایج نیاز دارد. سپس تاخیرها برای هر دسته از این روبش‌ها اعمال می‌شود که منجر به تشکیل تصویر با کیفیت بسیار بهتری از کل فضای داخل قطعه می‌شود. بهبود کیفیت تصویر روش تمرکز کامل، به چندین علت است. نخست آنکه چون امواج المان‌ها در یک نقطه خاص متمرکز نمی‌شوند، در نتیجه از سایر نقاط فضای داخل قطعه نیز اطلاعاتی به دست می‌آید؛ بر خلاف روش رایج که برای بررسی هر نقطه داخل قطعه باید حتماً در آن نقطه تمرکز اتفاق افتد و این موضوع برای همه نقاط امکان‌پذیر نیست. دوم آنکه چون همه المان‌ها تحریک نمی‌شوند، اثر الکترونیکی فرستنده آنها نیز حذف می‌شود که به لحاظ پیاده‌سازی الکترونیکی بسیار مفید است. در واقع در روش رایج، فعال شدن همه فرستنده‌ها که معمولاً در ولتاژ و جریان بالایی کار می‌کنند، سبب می‌شود تا نویزهایی بسیار قوی در مدارها منتشر شوند که حذف آنها دشوار است و اگر حذف نشوند تاثیر بسیار مخربی در ابتدای تصویر خواهند داشت. در واقع به همین دلیل در همه سیستم‌های رایج، ناحیه مرده از مساحت بزرگی برخوردار است. بنابراین سومین مزیت به کارگیری روش تمرکز کامل، کاهش حجم ناحیه مرده می‌باشد. چهارمین مزیت آن است که اگرچه حجم حافظه مصرفی و پردازش مورد نیاز نیز افزایش بسیار زیادی نسبت به روش‌های رایج می‌یابد، امکان استفاده از پردازش موازی با استفاده از مدارهای پیشرفته رایج امروزی نیز فراهم می‌شود؛ در حالی که روش‌های رایج از این موضوع نیز بی‌بهره هستند. در این مقاله از این روش برای تشکیل تصویر استفاده شده است.

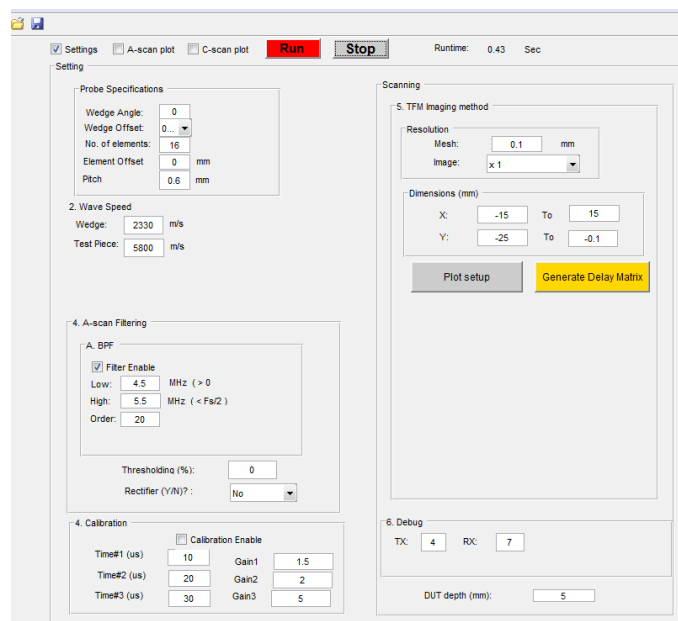
۲-۳- سخت‌افزار مجموعه

پروپ مورد استفاده در این تحقیق در فرکانس کاری 5MHz کار می‌کند و دارای ۱۶ المان می‌باشد. نرخ نمونه برداری برابر 40MHz و هر نمونه به صورت ۱۲ بیتی می‌باشد. پس از تحریک هر المان، سیگنال دریافتی از آن، ابتدا از یک قطعه جداساز حالت ارسال و دریافت عبور می‌کند و سپس به مبدل داده دیجیتال وارد می‌شود. داده‌های خروجی مبدل دیجیتال به واحد پردازنده سریع منتقل می‌شوند. با توجه به نرخ نمونه‌برداری 40MHz و تعداد ۱۲ بیت در هر نمونه، نرخ انتقال داده برای هر المان برابر

محاسبات است و به علاوه فضای قابل توجهی نیز برای ذخیره‌سازی احتیاج دارد. البته این محاسبات تنها در آغاز بازرسی، انجام می‌شود و خارج خط هستند. پس از تعیین کلیه تاخیرها، داده‌های دریافتی از پروب، به رایانه منتقل می‌شوند و سیگنال‌های A-scan برای کلیه المان‌ها تشکیل می‌شوند. سپس با استفاده از تاخیرهای محاسبه شده، برای تک تک نقاط مش، مقدار روشنایی تصویر محاسبه می‌شود و تصویر مذکور نمایش داده می‌شود.

به جهت سهولت بیشتر، نرم‌افزار مجهز به رابط کاربری مناسبی می‌باشد که در شکل ۶ نشان داده شده است. با کمک این رابط کاربری، می‌توان کلیه پارامترهای مورد نیاز در تصویربرداری فراصوتی را تعیین نمود.

عهده دارد. بدین منظور، ابتدا فضای داخل قطعه مش‌بندی شده و به تعدادی نقطه تقسیم می‌شود که از یکدیگر فاصله دارند. در این حالت محیط مذکور به صورت یک مستطیل در نظر گرفته می‌شود که تعداد N_x , N_y به ترتیب تعداد نقاط محیط مذکور در راستای دو محور افقی و عمودی هستند. به عنوان مثال اگر مستطیل مذکور دارای ابعاد $30\text{mm} \times 20\text{mm}$ باشد و $r=0.1\text{mm}$ ، آنگاه $N_y=300$ و $N_x=200$ خواهد بود. سپس برای هر نقطه، فاصله مکانی از هر یک از المان‌های پروب، محاسبه شده و تاخیرهای زمانی برای هر المان به نحوی که موج ارسالی المان‌ها همزمان به نقطه مذکور برسند، تعیین می‌شود. با توجه به وجود ۱۶ المان در این تحقیق، برای کل مش مورد ارزیابی، المان $16.N_x.N_y$ داده محاسبه می‌شود که حجم سنگینی از



شکل ۶: نمایی از رابط کاربری

جهت بررسی عملکرد مجموعه، ابتدا از یک پروب تخت فولادی همراه با تعدادی حفره استفاده شده است (شکل ۷). این پروب دارای ۶۴ المان در فرکانس 5MHz و با فاصله المان‌های برابر 0.6mm است که در این تحقیق از ۱۶ المان ابتدایی آن استفاده می‌شود. قطعه فولادی نیز به ضخامت 18mm می‌باشد و در آن از دو دسته سه تایی از حفره‌ها استفاده شده است. در کلیه آزمایش‌های این قسمت، پروب تخت بدون کفشک مورد استفاده قرار گرفته است و بنابراین، امواج فراصوتی به صورت نرمال و بدون زاویه وارد آن شده‌اند.

۴- نتایج

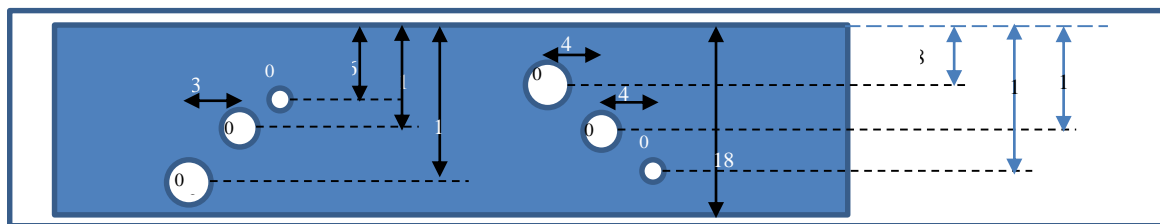
با توجه به آنکه این تحقیق جهت بازرسی جوش لوله‌های واتروال بویلر انجام شده است، دو نوع آزمون تخت و لوله‌ای برای آن انجام شده است که در ادامه تشریح می‌شوند. در کلیه تصاویر دریافتی، رزولوشن تصویر برابر 0.1mm و ابعاد تصویر برابر 20mmx30mm می‌باشد. بنابراین در مجموع ۶۰ هزار نقطه در تصویر نهایی نمایش داده می‌شود و زمانبری تشکیل هر تصویر در حدود 0.3 ثانیه بر روی رایانه-ای با پردازنده‌ای در فرکانس 4GHz است.

۴-۱ مجموعه آزمایشی پروب تخت و نتایج آن



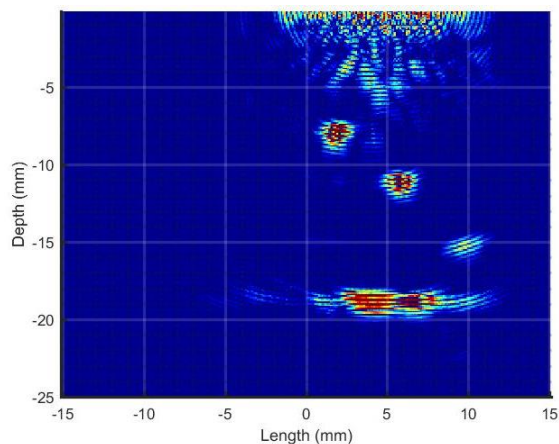
شکل ۷: مجموعه آزمایشی پروب تخت و قطعه فولادی

در شکل ۸ وضعیت حفره‌های ایجاد شده بر روی مجموعه آزمایشی پروب تخت نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که دو دسته حفره به قطرهای 0.8mm, 0.6mm, 0.3mm در سمت راست و چپ آن ایجاد شده‌است، به نحوی که در سمت راست، حفره بزرگتر بالاتر است و در سمت چپ پایینتر. دسته حفره‌های سمت راست قطعه تخت، به ترتیب در عمق 8mm, 11mm, 15mm قرار دارند و دسته حفره‌های سمت چپ به ترتیب در عمق 6mm, 10mm, 14mm واقع شده‌اند.

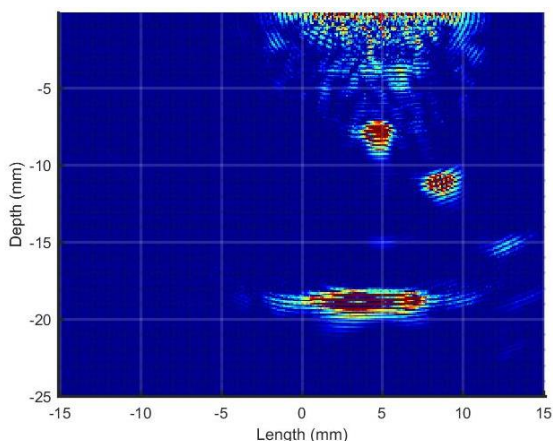


شکل ۸: وضعیت حفره‌های مجموعه آزمایشی نسبت به یکدیگر در قطعه تخت

یا سیگنال دریافتی آنها تضعیف شده‌است و در نتیجه تصویر دریافتی از حفره در عمق 15mm تضعیف شده‌است. با توجه به آنکه پروب به میزان 3mm جابجا شده‌است، تصویر حفره‌ها نیز به همین میزان جابجا می‌شود که مورد انتظار است. در حقیقت در این حالت، گویی دوربین تصویری از داخل قطعه، 3mm جابجا شده‌است که در نتیجه تصویر حفره‌ها جابجا شده و کیفیت نمایش آنها نیز به نسبت دور یا نزدیکی از حفره‌ها تغییر می‌یابد.



شکل ۹: تصویر دریافتی از پروب تخت و سه حفره سمت راست آن



شکل ۱۰: تصویر سه حفره سمت راستی قطعه تخت پس از 3mm جابجایی پروب

در شکل ۹ نتایج انجام آزمایش با استفاده از پروب تخت نشان داده شده‌است. در این شکل، تصویر B-scan از سه حفره جانبی سمت راست قطعه تخت، نشان داده شده‌است و به طور واضح قابل تشخیص هستند. توجه شود که ناحیه پررنگ در عمق 18mm، کف قطعه می‌باشد. سایه‌های موجود در تصویر، از ویژگی‌های تصویری فراسوتی می‌باشند.

با جابجایی پروب به میزان 3mm، تصویر شکل ۱۰ حاصل می‌شود که در آن به علت عبور پروب از روی پایین‌ترین حفره، تعدادی از المان‌ها سیگنالی از آن دریافت نمی‌کنند،

نگهدارنده مکانیکی که در داخل کشور ساخته شده است و همراه با پروب متصل به آن و سیستم آبرسانی بر روی لوله میانی نصب شده است. پروب مورد استفاده در این مجموعه، همراه با یک کفشک به زاویه ۶۰ درجه مورد استفاده قرار گرفته است و بنابراین، امواج فراصوتی از نوع عرضی و با زاویه ۶۰ درجه وارد قطعه می شوند.

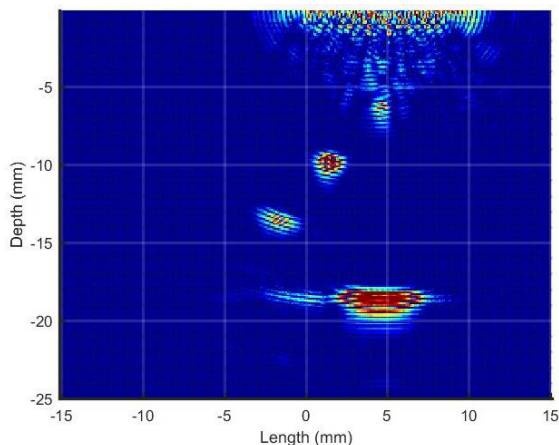
جهت بررسی عملکرد مجموعه دو حفره در لوله میانی که نگهدارنده مکانیکی بر روی آن نصب شده است، تعبیه شده است. جهت حفره ها، عمود بر محور لوله و همراستا با محور چرخش پروب بوده و به صورت سرتاسری می باشند. مجموعه حفره ها و نحوه تعبیه آنها بر روی لوله در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



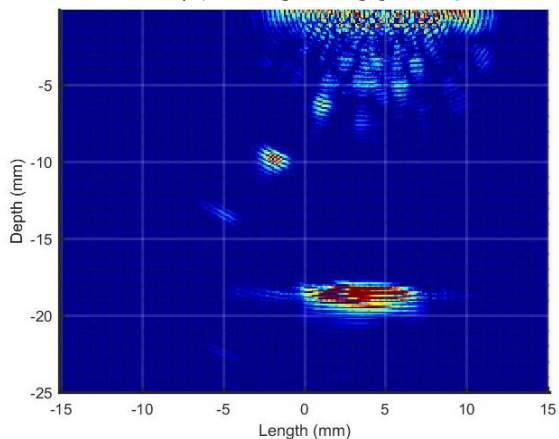
شکل ۱۳: (بالا) نمایی از مجموعه شبیه ساز لوله های واتروال بویلر همراه با نگهدارنده مکانیکی بر روی آن، (پایین) نمایی از دو حفره بر روی لوله میانی

در این حالت به دلیل قرار گرفتن پروب بر روی کفشک، امواج فراصوتی به صورت مورب منتشر شده و بازتاب می شوند و در نتیجه پروب در فاصله تقریبی افقی در حدود 5mm از حفره ها قرار می گیرد. تصویر اخذ شده از آزمایش های انجام شده بر روی مجموعه شبیه سازی شده در شکل ۱۴ بالا ارائه شده است که در آن، تصویر دو حفره به خوبی

در آزمونی دیگر، حفره های سمت چپ قطعه تخت مد نظر قرار می گیرند که تصویر آنها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بار دیگر، پروب به میزان 4mm جابجا می شود و تصویر دیگری حاصل می شود که در آن مجدداً تصویر پایین ترین حفره تضعیف شده است (شکل ۱۲).



شکل ۱۱: تصویر سه حفره سمت چپ قطعه تخت



شکل ۱۲: تصویر سه حفره سمت چپ قطعه تخت پس از 4mm جابجایی

در ارتباط با نتایج ارائه شده در این قسمت، ذکر این نکته ضروری است که به دلیل به کارگیری الگوریتم تمرکز کامل، تصاویر از کیفیتی بسیار بالا برخوردار هستند و تفکیک پذیری آنها قابل توجه است. چنانچه ملاحظه می شود در کلیه تصاویر فوق، حفره به قطر 0.3mm به خوبی قابل تشخیص است.

۲-۴ مجموعه شبیه ساز لوله های واتروال بویلر و نتایج آن به جهت شبیه سازی لوله های واتروال بویلر از سه قطعه لوله به قطر 60mm و ضخامت 8mm استفاده شده است (شکل ۱۳ راست). این لوله ها مشابه لوله های واتروال بویلر، در فاصله 14mm از یکدیگر قرار داده شده اند تا وضعیت بویلر را شبیه سازی نمایند. مجموعه با استفاده از یک

گرفته می‌شود، تشریح شد. اجزای مختلف سیستم شامل پروب آرایه فازی، مدارهای الکترونیکی و برنامه نرم‌افزاری آن تشریح شدند. سپس در بخش نتایج با استفاده از دو مجموعه آزمایشی تدارک دیده شده در آزمایشگاه پژوهشگاه نیرو، تصاویر اخذ شده از مجموعه ارائه شدند. بر اساس نتایج اخذ شده، سیستم ساخته شده در ارائه تصویر نقص‌های اعمال شده در لوله‌های فلزی اعم از فولادی یا آلومینیومی کاملاً موفق است. همچنین به دلیل طراحی خاص آن برای لوله‌های واتروال بویلر، چرخش و تصویربرداری آن از دور لوله‌های بویلر به آسانی امکان‌پذیر می‌باشد. به دلیل به کارگیری روش تمرکز کامل، کیفیت تصاویر آن نیز بهتر از روش متداول اخذ تصاویر فراصوتی می‌باشد. بهبود کیفیت تصویر از طریق اعمال پردازش‌های بیشتر و بهبود نرم‌افزار کاربری آن جهت اندازه‌گیری‌های بیشتر و دقیق‌تر و دستیابی به تفکیک‌پذیری بالاتر با بهبود سخت‌افزار ساخته شده، مواردی است که در تحقیقات آتی نویسندگان مورد توجه قرار خواهد گرفت.

۶- قدردانی و تشکر

نویسندگان این مقاله، وظیفه خود می‌دانند مراتب ویژه سپاسگزاری خود را از آقایان مهدی رضایی و بهروز عبدلی به عمل آورند. همچنین کمال سپاسگزاری و قدردانی را از آقایان امیر نریمانی و اسماعیل افشار از نیروگاه شهید مفتاح همدان که در اجرای این تحقیق همکاری بسیار با نویسندگان داشتند، ابراز می‌دارند. همچنین وظیفه خود می‌دانند از مشاوره و راهنمایی‌های آقایان مرتضی ثانی خانی و میثم علیزاده که در به ثمر رسیدن این تحقیق نقش به سزایی داشتند، نیز کمال تشکر و قدردانی را داشته باشد.

۷- منابع

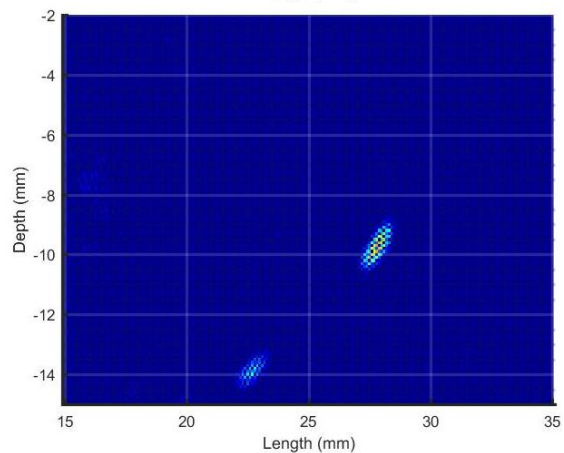
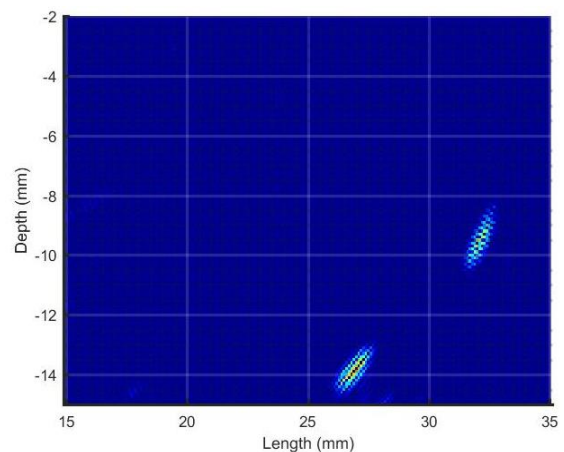
W. Du, Y. Zhao, R. Roy, S. Addepalli, and Lawrence Tinsley, "A review of miniaturised Nondestructive Testing technologies for in-situ inspections," *Procedia Manufacturing*, vol. 16, pp. 16-23, 2018.

I. Amenabar, A. Mendikute, A. López-Arriaza, M. Lizaranzu, and J. Aurrekoetxea, "Comparison and analysis of Nondestructive testing techniques suitable for delamination inspection in wind turbine blades," *Composites: Part B*, vol. 42, no. 5, pp. 1298-1305, 2011.

R. J. Ditchburn, S. K. Burke, and C. M. Scala, "NDT of welds: state of the art," *Ndt & e International*, vol. 29, no. 2, pp. 111-117, 1996.

حقیقی، و.، هنرور ف.، (۱۳۸۶)، "طراحی و ساخت روبشگر فراصوتی بمنظور تهیه تصاویر روبش B به کمک تکنیک TOFD"، هشتمین

و به ترتیب در عمق 9mm و 14mm قابل مشاهده هستند. در صورت چرخش نگهدارنده به دور لوله، تغییری در تصویر ایجاد نمی‌شود ولی اگر نگهدارنده در راستای محور لوله حرکت کند، به علت دور شدن تدریجی آرایه فراصوتی از محل حفره، تصویر حفره تضعیف می‌شود. این موضوع در شکل ۱۴ پایین نشان داده شده است که در آن مجموعه پروب و کفشک به میزان 5mm به حفره نزدیک شده است و در نتیجه در این حالت کاملاً بر روی حفره قرار گرفته است. با توجه به آنکه امواج با زاویه ۶۰ درجه وارد قطعه می‌شوند، در این حالت، برخورد کمی با حفره‌ای که کاملاً زیر قطعه وجود دارد، دارند و در نتیجه بازگشت‌ها ضعیف شده و منجر به تضعیف تصویر دریافتی می‌شود.



شکل ۱۴: بالا) تصویر دو حفره روی لوله، پایین) تصویر دو حفره مذکور پس از جابجایی مجموعه پروب و کفشک به میزان 5mm در راستای محور لوله و تضعیف تصویر حفره پایینی

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی و ساخت سیستم تصویربرداری فراصوتی که با موفقیت در پژوهشگاه نیرو ساخته شده است و به منظور بازرسی جوش لوله‌های واتروال بویلر به کار

L.W. Schmerr, "An ultrasonic system," *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, Springer, pp. 1-13, 2016.

J. Zhang, B. W. Drinkwater, P. D. Wilcox, "Effects of array transducer inconsistencies on total focusing method imaging performance," *NDT&E International*, vol. 44, pp.361-368, 2011.

C. Holmes, B. W. Drinkwater and P. D. Wilcox, "Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmitreceive array data for Nondestructive evaluation," *NDT & E International*, vol. 38, no. 8, pp. 701-711, 2005.

Y. Javadi, et al. "Ultrasonic phased array inspection of wire plus arc additive manufacture(WAAM) samples using conventional and total focusing method (TFM) imaging approaches," 57th The British Institute of Nondestructive Testing Annual Conference, East Midlands, 2018.

S.L. Crawford, M.T. Anderson, A.A. Diaz, M.R. Larche, M.S. Prowant, and A.D. Cinson, "Ultrasonic Evaluation and Imaging," *Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection*, Springer, London, pp. 393-412, 2015.

کنفرانس ملی جوش و بازرسی ایران، تهران، انجمن جوشکاری و آزمایشهای غیرمخرب.

S. M. Sakhaei, "A decimated minimum variance beamformer applied to ultrasound Imaging," *Ultrasonics*, vol. 59, pp. 119-127, 2015.

M. Li, and G. Hayward, "Ultrasound Nondestructive Evaluation (NDE) Imaging with Transducer Arrays and Adaptive Processing," *Sensors*, vol. 12, no. 1, pp. 42-54, 2012.

بکرانی، م.، حمیتی واقف، و.، (۱۳۹۷)، "طراحی و پیاده‌سازی شبیه-ساز انواع روش‌های تصویربرداری فراصوتی آزمون‌های غیرمخرب"، *مجله صوت و ارتعاش*، سال هفتم، شماره ۱۳.

بکرانی، م.، حمیتی واقف، و.، (۱۳۹۷)، "ارائه روش بهبودیافته تصویربرداری فراصوتی در بازرسی جوش"، پذیرفته شده در نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران.

Ziksari, M. S., and B. Mohammadzadeh-Asl, "Combined phase screen aberration correction and minimum variance beamforming in medical ultrasound," *Ultrasonics*, vol. 75, pp. 71-79, 2017.

Olympus, N.D.T, "Introduction to phased array ultrasonic technology applications. D Tech Guideline", Olympus NDT, 2004.

Implementation of an Imaging System Using Ultrasonic Phased Array

Vahid Hamiyati Vaghef¹, Mahdi Bekrani²,

¹Assistant professor, Niroo Research Institute; vvaghef@nri.ac.ir

² Assistant professor, Industrial University of Qom, bekrani@qut.ac.ir

Abstract

Ultrasonic imaging using phased arrays is a crucial Nondestructive test. In this paper, a phased array ultrasonic system is designed and implemented. It is implemented using integrated electronic circuits which results in higher image quality and lower noise, lower cost, lower weight and smaller dimensions with respect to current systems. The implemented system supports all phased array probes with standard connector up to 16 elements and its sampling rate is 40MHz and is capable of upgrading to higher number of elements and sampling frequencies. Imaging is implemented using total focusing method which results in higher quality images with lower noise in comparison to regular phased array images. Portability, development to use in all Nondestructive imaging tests and a lower price in comparison to current imaging systems, are major features of this product. The experimental results demonstrate that the system easily distinguishes between three holes with 0.8mm, 0.6mm and 0.3mm diameter.

Keywords: Ultrasonic imaging, Ultrasonic phased array, A-scan, B-scan, Total focusing method.

فراصوت تشخیصی، روشی غیرمخرب در کیفیت سنجی محصولات کشاورزی-غذایی

محمد رضا زارع زاده^۱، محمد ابونجمی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس ابرویحان دانشگاه تهران

^۲ دانشیار، گروه فنی کشاورزی پردیس ابرویحان دانشگاه تهران

* abonajmi@ut.ac.ir

چکیده

روش‌های متعددی برای ارزیابی کیفیت و تعیین تقلب در مواد غذایی و محصولات کشاورزی وجود دارد. این روش‌ها می‌تواند به صورت مخرب و یا غیرمخرب باشد. مزیت سامانه‌های غیرمخرب، استفاده از نمونه پس از آزمون بوده همچنین می‌توان تمام مواد را مورد آزمون قرار داد، درحالی‌که در روش مخرب به علت تخریب ماده، بایستی آزمایش‌ها بر روی نمونه‌ها صورت گیرد. یکی از آزمون‌های غیرمخرب روش فراصوتی است که می‌تواند در تعیین کیفیت محصولات کشاورزی و دامی و فرآورده‌های آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می‌توان با فناوری فراصوت از ایمنی مواد غذایی همچون وجود مواد خارجی مثل سنگ، شیشه و... اطلاع حاصل کرد. فراصوت یک روش تشخیصی غیر مخرب، سریع، کم هزینه، قابل حمل و دوستدار محیط زیست می‌باشد که به آسانی قابل استفاده توسط هر شخص بوده و استفاده از آن، نیاز به مهارت خاص و پیچیده ندارد. در این بررسی کاربردهای فراصوت تشخیصی به سه دسته تقسیم بندی شده و هر کدام به طور مجزا بحث شده است. این طبقه بندی شامل تشخیص تقلب و تعیین کیفیت محصولات کشاورزی، محصولات دامی و طیور و روغن‌ها، آب میوه‌ها و مایعات می‌باشند. در انتها چالش‌ها و مشکلات استفاده از روش فراصوتی بحث و جمع‌بندی شده و روش‌های کاهش این مشکلات و بهینه کردن و افزایش راندمان آورده شده است.

واژگان کلیدی: فراصوت، غیرمخرب، مواد غذایی، کیفیت، تقلب

۱- مقدمه

غذایی می‌باشد، چون ظاهر و رنگ محصول در آن لحظه در اغلب مواقع تنها فاکتورهای کیفی در دسترس بوده که اطلاعات مستقیم از ماده‌ی غذایی را در اختیار قرار می‌دهند. ارزیابی کیفی مواد غذایی به خصوص زمانی که ظاهر ماده‌ی غذایی و محصول کشاورزی رابطه‌ای با کیفیت آن ندارد، به سختی صورت می‌گیرد. روش‌های مختلف ارزیابی کیفی مواد غذایی و محصولات کشاورزی شامل روش‌های مخرب^۲ و غیرمخرب^۳ می‌شود. آزمایش‌هایی غیرمخرب محسوب می‌شوند که اثرات مخرب فتوفیزیکی، حرارتی، شیمیایی، مکانیکی و فتوشیمیایی نداشته باشند [۸]. اغلب تقلب‌های متداول امروزی، بیشتر در مواد غذایی پرمصرف مانند روغن‌های گیاهی، آبلیمو، فرآورده‌های غلات، فرآورده‌های لبنی، فرآورده‌های گوشتی، ادویه‌جات، عسل، چای و برخی فرآورده‌های کنسروی مانند رب گوجه فرنگی صورت می‌گیرد که ارزیابی دقیق و سریع میزان اصالت آنها حائز

کیفیت مواد غذایی از جنبه‌ها و پارامترهای مختلفی بررسی و ارزیابی می‌گردند که هدف نهایی، کسب حداکثر رضایت مصرف‌کنندگان است. این پارامترها به دسته‌های کلی مکانیکی، ظاهری و درونی تقسیم می‌شوند. برای اندازه‌گیری این پارامترهای مختلف و بسته به نوع ماده غذایی و ویژگی‌های ماده بسته‌بندی، روش‌های مختلفی همچون ماشین‌بینایی برای بررسی پارامترهای ظاهری، فراصوتی برای تشخیص و تعیین خواص درونی و یا تشخیص اشیای خارجی در مواد غذایی بسته بندی شده، ماشین-بوایی برای تعیین خواص بوایی، آزمون ضربه برای تعیین خواص آسبابانی محصولاتی مثل غلات، طیف‌سنجی فروسرخ نزدیک (NIR)^۱ و بسیاری روش‌های دیگر می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند [۷-۱]. ملاک انتخاب مواد غذایی برای مصرف‌کنندگان در مرحله‌ی اول بر اساس ظاهر آن ماده

¹ Near Infrared

² Destructive

³ Non-Destructive

شکل، حجم و رطوبت)، درجه بندی و جداسازی مواد غذایی و... نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد

سرعت فراصوت نسبت به ساختار مولکولی و ارتباطات بین مولکولی بسیار حساس است که از این نظر برای تعیین ترکیبات، ساختار و حالت فیزیکی، تشخیص اشیای خارجی و عیوب در مواد غذایی فرآوری و بسته بندی شده مناسب است. سرعت فراصوت در مواد جامد بیشتر از سرعت آن در مایعات و در مایعات بیشتر از آن گازها می‌باشد. هرچه ماده متراکم‌تر باشد، انتشار موج فراصوت سریع‌تر خواهد بود [۱۴-۲۳]. انرژی فراصوت به طور معناداری با فاصله ای که در محیط طی می‌کند، کاهش می‌یابد که نتیجه‌ای از کاهش دامنه سیگنال با طول مسیر می‌باشد. علاوه بر سرعت، ضریب تضعیف و امپدانس آکوستیکی، پارامترهای دیگری هستند که به جنس ماده بستگی دارند. وقتی امواج فراصوتی در یک ماده حرکت می‌کنند، به تدریج انرژی خود را از دست می‌دهند که تحت عنوان تضعیف بیان می‌شود. ضریب تضعیف (α) مطابق فرمول ۱ به دست می‌آید [۱۱]:

$$A=A_0 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

که در آن A_0 و A به ترتیب مقدار دامنه‌ی اولیه موج و دامنه‌ی موج تضعیف شده و x فاصله ای می‌باشد که موج در داخل ماده طی نموده است.

اصولاً تضعیف با ضریب تضعیف که دارای واحد $1/cm$ یا dB/cm می‌باشد، شناخته می‌شود. پدیده‌ی تضعیف در اثر عواملی مثل ۱- بازتاب^۴، ۲- شکست^۵، ۳- جذب^۶ و ۴- پراکندگی^۷ اتفاق می‌افتد (شکل ۲). فناوری فراصوت برای تشخیص تقلب مواد غذایی، یک روش ایمن، غیرتهاجمی، ارزان و اغلب قابل حمل است که می‌تواند در تشخیص تقلب در روغن‌های خوراکی و سرخ کردنی، انواع میوه و آب‌میوه، انواع گوشت، نان و... مورد استفاده قرار گرفته و برخلاف برخی روش‌های دیگر، باعث فساد فیزیکی یا بهداشتی نمی‌گردد [۲۴]. جدول ۱ لیستی از ضرایب تضعیف چند ماده را نشان می‌دهد.

اهمیت است؛ این موضوع بخصوص زمانی که محصول دارای قیمت بالا می‌باشد، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند [۹ و ۱۰]. در این مقاله کاربرد فراصوت تشخیصی در تعیین کیفیت و تشخیص تقلب در محصولات کشاورزی، دامی و نوشیدنی - ها به عنوان یک روش موثر، کم هزینه و قدرتمند بررسی و بحث خواهد شد.

۲- فراصوت

این روش بر مبنای اختلاف سرعت عبور صوت، ضریب تضعیف و ... که در مواد مختلف مشاهده می‌شود، عمل می‌کند. برای این کار از یک فرستنده امواج فراصوتی در یک سمت و یک گیرنده امواج در طرف مقابل آن استفاده می‌شود و یا تنها از یک عدد حسگر ارسال و دریافت^۱ موج استفاده می‌شود. فراصوت امواج درون محدوده ۲۰ کیلوهرتز تا ۱۰ مگاهرتز را شامل می‌شود که مطابق شکل ۱ به سه ناحیه اصلی طبقه بندی می‌شوند: فراصوت فرکانس پایین - توان بالا (۲۰ تا ۱۰۰ کیلوهرتز)، فراصوت توان متوسط - فرکانس متوسط (۱۰۰ کیلوهرتز تا یک مگاهرتز) و فراصوت فرکانس بالا - توان پایین (یک تا ده مگاهرتز). معمولاً از فراصوت تشخیصی^۲ با توان پایین برای شدت‌های کمتر از یک وات بر سانتی‌متر مربع استفاده می‌شود که می‌تواند برای آنالیز غیرتهاجمی و پایش انواع مواد غذایی و همچنین اشیای خارجی در طی فرایند فرآوری و انبارداری جهت حصول اطمینان از کیفیت بالا و ایمنی مورد استفاده قرار گیرد [۱۲ و ۱۳]. فراصوت قدرتی (بسامد ۱۰۰-۲۰ کیلوهرتز و توان $10-10000 \text{ W.cm}^{-2}$) کاربردهای مختلفی در صنایع غذایی دارند و شامل خشک کردن، استخراج روغن، هموژنیزاسیون، برش، گاززدایی، ترد کردن گوشت، فیلتراسیون، تعیین کیفیت تخم‌مرغ، تشکیل امولسیون، استریلیزاسیون تجهیزات، کریستالیزاسیون چربی‌ها، تمیز کاری سطوح، شستشوی عمقی^۳، به عنوان کاتالیزور واکنش‌های اکسیداسیون و استخراج ترکیبات مولد عطر و طعم می‌باشد. البته فناوری‌های صوتی در بررسی مواد غذایی (تردی، سفتی و بافت)، تعیین خواص فیزیکی (اندازه،

¹ Pulse-Echo

² Diagnostic ultrasound

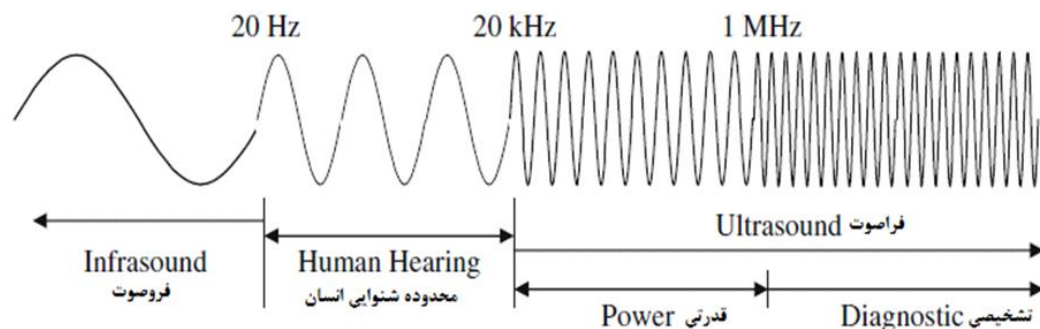
³ Deep washing

⁴ reflection

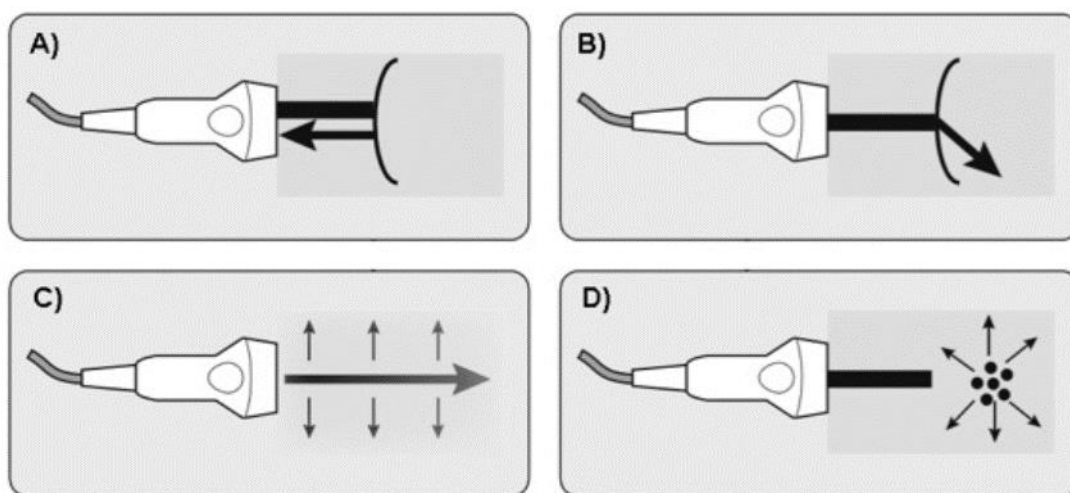
⁵ refraction

⁶ absorption

⁷ diffraction



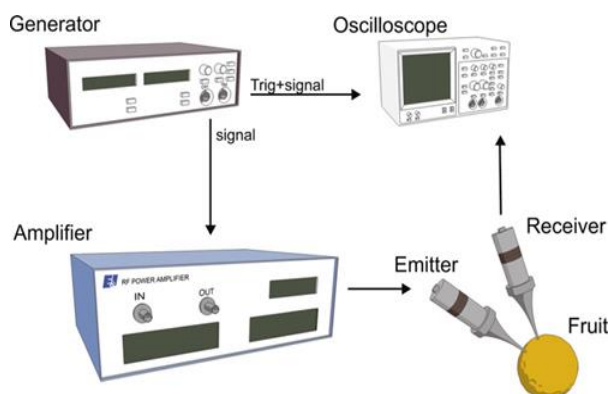
شکل ۱- دامنه فرکانسی طیف صوتی [۱۱]



شکل ۲- ۱. بازتاب، ۲. شکست، ۳- جذب و ۴- پراکندگی در امواج فراصوتی

سرعت فازی امواج فراصوتی و ضریب تضعیف یا میرایی می- نامند که کاربردهای خاص آن‌ها در توصیف و ردیابی عیب، چگالی، خواص کشسانی مکانیکی است.

کاربردهای فراصوت در صنایع غذایی روز به روز در حال افزایش است. از جمله این کاربردها می‌توان در خشک کردن [۲۵]، هموژن کردن [۲۶]، فراوری [۲۷]، از بین بردن میکروارگانیسم‌ها [۲۸]، تهیه امولسیون‌ها [۲۹]، استخراج روغن [۳۰]، اسانس و رنگدانه، تشخیص تقلب و تعیین کیفیت مواد غذایی، میزان رسیدگی محصولات کشاورزی [۳۱] و... اشاره نمود. این موارد در دو دسته کلی فراصوت تشخیصی و فراصوت قدرتی^۱ طبقه بندی می‌شوند. به کارگیری امواج فراصوتی برای کیفیت‌سنجی، نیازمند دانستن و اندازه گیری ویژگی‌های فراصوتی ماده مورد نظر است. با توجه به روش‌های اندازه گیری، ویژگی‌های فراصوتی مورد اندازه گیری متفاوت است. مهم‌ترین متغیر مورد اندازه گیری در حوزه زمان و میرایی، سرعت امواج و نوسانات سیگنال‌های عبوری/انعکاسی و ارسال در فرکانس و اندازه پرتو داده شده است. این دو خاصیت مهم را به طور خلاصه،



شکل ۳- سامانه فراصوتی تشخیصی [۵۲]

¹ Power Ultrasound

جدول شماره ۱- ویژگی‌های آکوستیکی چند ماده مختلف [۳۲-۳۷ و ۱۷]

Material	Velocity [m/s]	Impedance [$\text{kg/m}^2 \text{s}$] $\times 10^6$	Attenuation [Np/m]	Note
Air ¹	343	0.0004	138	1 MHz
Aluminum ¹	6320	17	0.21	1 MHz
Glass (crown) ⁴	5660	14.15	2	10 MHz
Oriented nylon ³	2600	2.9	148.5	5 MHz
Plexiglass ¹	2670	3.2	23	1 MHz
Polypropylene ³	2740	2.4	58.7	5 MHz
Polystyrene ⁴	2350	2.47	23	2.5 MHz
Polyvinylidene chloride (PVDC) ³	2380	4.2		
PZT-5H (Lead zirconate titanate) ⁵	4175	31.4	576	24 MHz
Stainless steel ²	5660	45.45		
Water ¹	1480	1.48	0.025	1 MHz
Avocado ⁶	338.1 \pm 55.7		258 \pm 43	50 kHz transducer, first day fruit
Cheddar cheese ⁷	1669 \pm 10			1 MHz transducer, 250-day average
Cherry marmalade: processed ⁸	1420 \pm 30	1.63 \pm 0.03		5 MHz transducer
Cherry marmalade: unprocessed ⁸	1330 \pm 30	1.44 \pm 0.03		5 MHz transducer
Chunk cheese: Jämtgård ⁸	1842 \pm 70	1.73 \pm 0.06	7.97 \pm 0.22	5 MHz transducer
Corn-oil-in-water ⁹	1477		29	3 MHz, 20 wt % oil droplet mean diameter 1.5 μm
Margarine: extra salty ⁸	1118 \pm 20	1.21 \pm 0.02	8.93 \pm 0.46	5 MHz transducer
Margarine: normal salty ⁸	1145 \pm 130	1.28 \pm 0.03	2.36 \pm 0.44	5 MHz transducer
Mahon cheese (fresh) ¹⁰	1645 \pm 20			1 MHz transducer, 60-day average
Mahon cheese (half ripened) ¹⁰	1676 \pm 12			1 MHz transducer, 90-day average
Mahon cheese (ripened) ¹⁰	1715 \pm 25			1 MHz transducer, 240-day average
Processed cheese: Grevé ⁸	1323 \pm 20	1.38 \pm 0.02	9.05 \pm 0.37	5 MHz transducer
Processed cheese: Naturelle ⁸	1311 \pm 50	1.32 \pm 0.04	3.72 \pm 0.34	5 MHz transducer
Canned peach ¹¹	1550 \pm 30	2.02	690 \pm 45	Mean value of frequency 4-12 MHz, $dv_p/df \sim 0$
Peach syrup ¹¹	1575 \pm 5	1.69	3	10 MHz
Sobrassada from Mallorca ¹²	1626 \pm 6			1 MHz transducer, 80 day average
Tomato ketchup ¹³	1658			2.25 MHz transducer, 100 wt % concentration

تلفات بیش رسیدگی در حین برداشت بسیار حائز اهمیت است. مطابق نظر بسیاری از نویسندگان، استفاده از فرکانس‌های زیر ۲۰۰ کیلوهرتز، بهترین نتیجه را در زمان استفاده از فراصوت تشخیصی روی میوه و سبزیجات به دست می‌دهد [۴۰-۴۲]. تحقیق بر روی میوه هلو نشان داد که رابطه‌ی خوبی بین ضریب تضعیف و سرعت امواج فراصوت با سفتی، میزان pH و اسیدیته وجود دارد. [۴۳]. موریسون و ایبرات [۴۴] توانستند کیفیت پرتقال را با استفاده از فناوری فراصوت ارزیابی کرده و بدینوسیله زمان صحیح برداشت محصول و نیز مدت زمان انبارمانی^۱ محصول را بهینه نمودند. فرکانس سامانه فراصوتی آن‌ها ۱۰۰ کیلوهرتز بوده و آزمایش به روش پالس-اکو صورت گرفت. استفاده از روش فراصوتی در تشخیص پوکی سیب زمینی توسط ژیوانوانگ و همکاران [۴۵] صورت پذیرفت. آن‌ها به کمک یک جفت مبدل فراصوت ۵۰ کیلوهرتز ۰.۲۲، کیلوواتی غده‌ها را در معرض موج فراصوت قرار دادند و از میزان کاهش شدت صوت (میرایی موج) پس از عبور از بافت سیب‌زمینی برای معین کردن معیاری برای جداسازی سیب‌زمینی‌های پوک از غیر پوک استفاده نمودند. مطابق نتایج، توانایی این روش برای تشخیص پوکی به پوکی‌هایی

۳- تشخیص تقلب و تعیین کیفیت با فراصوت

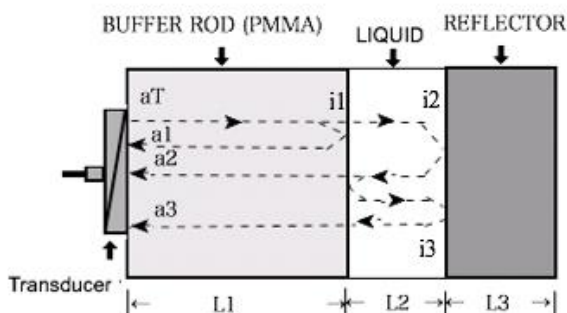
همان‌طور که قبلاً بحث شد، تعیین کیفیت و تشخیص تقلب مواد با فراصوت بر اساس استخراج ویژگی‌هایی از سیگنال اکتسابی از موج فراصوتی در ماده است که پس از عبور از ماده دچار تغییر شده‌اند. به بیان دیگر مقدار تغییر خصوصیت موج فراصوتی ارسال شده و دریافتی از ماده، سنجیده و به کیفیت آن ارتباط داده می‌شود (شکل ۳). جهت بررسی تفصیلی، بررسی کیفیت و تقلب در مواد غذایی در بخش‌های الف. محصولات کشاورزی، ب. محصولات دامی و طیور و ج. روغن‌ها، آرمیوه‌ها و مایعات آورده می‌شوند:

۳-۱- تشخیص تقلب و تعیین کیفیت محصولات کشاورزی

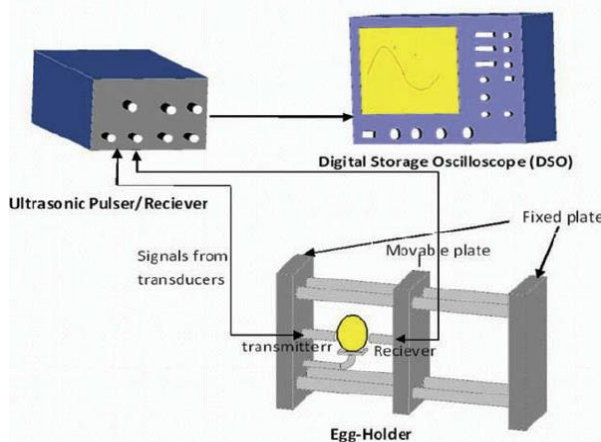
تاکنون تحقیقات زیادی برای ارزیابی کیفی انواع میوه و تعیین خواص فیزیکی، شیمیایی، بیوشیمیایی و مکانیکی آن‌ها با استفاده از فناوری فراصوت صورت گرفته است (جدول ۲). کاربرد فراصوت تشخیصی روی میوه و سبزیجات شامل دو جنبه می‌باشد: اول بررسی کل میوه و دوم بررسی قسمتی از میوه برش خورده. یکی از مزایای مهم این کار، تخمین زمان برداشت محصول بوده که برای جلوگیری از

¹ Shelf life

فرکانس نامی دستگاه مورد استفاده آنها ۱۵۰ کیلوهرتز بود (شکل ۵).



شکل ۴- شماتیک روش پالس-اکو در فراصوت تشخیصی



شکل ۵- تعیین تازگی تخم مرغ با فراصوت [۴۸]

همچنین کرتس و همکاران [۴۹] توانستند به کمک فراصوت ۲۵۰ کیلوهرتز کیفیت پنیر را ارزیابی کنند. آنها پارامترهای TOF^1 ، پراکندگی امواج و دامنه را بررسی نمودند و همبستگی بین دامنه سیگنال و زمان نگهداری و انرژی سیگنال با زمان نگهداری (انبار داری) را به ترتیب برابر $R^2=0.99$ و $R^2=0.93$ به دست آوردند.

سینگ و ویودی [۵۰] نیز تغییر سرعت عبور موج فراصوت در عسل را بررسی نمودند و ارتباط مستقیمی بین سرعت فراصوت و بعضی خصوصیات عسل مثل چگالی، ویسکوزیته و همگنی آن پیدا کردند و از این طریق توانستند تقلب در آن را تشخیص دهند.

۳-۳- تشخیص تقلب و تعیین کیفیت روغن‌ها، آبیوم‌ها و مایعات

اخیراً تقلب در نوشیدنی‌ها و روغن‌های خوراکی با افزودن مواد ارزان قیمت و یا آب به ماده افزایش یافته است. برخی تولیدکنندگان به دلیل قیمت ارزان‌تر به جای استفاده از

با حجم حداقل ۰.۵ سانتیمتر مکعب محدود می‌باشد. همچنین آنها نشان دادند که ویژگی‌های اندازه‌گیری شده سیب زمینی مانند مدول الاستیسیته، طول غده، قطر، و وزن رابطه‌ی ضعیفی با پارامترهای فراصوتی مانند سرعت، ضریب میرایی و ولتاژ مربع میانگین ریشه دارد. همچنین با توجه به احتمال بالاتر وجود پوکی در سیب زمینی‌های درشت، با حذف سیب زمینی‌های دارای وزن کمتر از 300 گرم، دریافتند که می‌توان تنها 80 درصد جرم کلی سیب-زمینی‌ها را باید از نظر وجود پوکی آزمایش کرد. معماری دستجردی و همکاران [۵۸] نیز کیفیت میوه گلابی را به صورت غیر مخرب و با روش امواج فراصوت عبوری بررسی نمودند. آنها دریافتند رابطه‌ی خطی بین سفتی و سرعت امواج فراصوت وجود دارد و با افزایش میزان سفتی میوه، سرعت امواج افزایش می‌یابد همچنین مشاهده کردند که رابطه‌ی منفی بین سفتی و ضریب تضعیف وجود دارد و با افزایش میزان رسیدگی یعنی کاهش سفتی، ضریب تضعیف به صورت نمایی افزایش می‌یابد.

۲-۳- تشخیص تقلب و تعیین کیفیت محصولات دامی و طیور

مقالات متعددی فراصوت تشخیصی (LPU) را برای مطالعه‌ی ترکیبات ماهی و طیور به کار برده‌اند. مک کلمنت و سایر نویسندگان برای تخمین محتوای رطوبت و مقدار پروتئین فیله ماهی ارتباط بین ویژگی‌های فراصوتی ماهی و خصوصیات آن را بررسی نمودند [۴۶ و ۴۷]. یکی از پرمصرف‌ترین خوراکی‌های مردم جهان، تخم مرغ است. به همین دلیل لازم است از تاریخ تولید و انقضای تخم مرغ اطلاع داشت. ابونجمی و همکاران [۴۸] در سال ۲۰۰۹ کیفیت سنجی شاخص‌های تازگی تخم مرغ خوراکی را با استفاده از اندازه‌گیری سرعت فازی سیگنال امواج فراصوت و میرایی در داخل ماده تخم مرغ بررسی نمودند. آنها دریافتند با افزایش زمان نگهداری تخم مرغ‌ها، عدد‌ها و شاخص زرده کاهش و عمق حفره‌هاوی افزایش می‌یابد. همچنین سرعت فازی سیگنال‌های صوتی در شرایط مختلف محیطی کاهش می‌یابد. به طوری که سرعت از ۱۵۷۱ متر بر ثانیه در روز اول به ۱۵۴۰ متر بر ثانیه در شرایط نگهداری در یخچال و ۱۵۱۴ متر بر ثانیه در شرایط نگهداری در محیط آزمایشگاه پس از سه هفته است.

¹ Time Of Flight

مدل Olympus 5077PR و سامانه پالس-اکو استفاده نمودند. از یک دفلکتور جهت حداکثر بازتاب استفاده نمودند و همپوشانی های امواج برگشتی را با تغییر فاصله مسیر طی شده امواج در داخل روغن، به حداقل رساندند. ژائو و همکاران [۵۲] در سال ۲۰۰۳ با استفاده از فناوری فراصوت، امکان سنجی تشخیص اشیای خارجی را در چند نوشیدنی از جمله آب بررسی نمودند. آنها با استفاده از یک سامانه فراصوتی با فرکانس نامی ۱۵ مگاهرتز و با نرم افزار LABVIEW توانستند اشیای خارجی اندازه ذرات بین ۲۵ تا ۱۰ میلیمتر مربع مثل فلز، تکه های شیشه و پلاستیک را با سامانه پالس-اکو تشخیص دهند. جهت متصل کردن سنسور با جداره ظرف حاوی مایع (یکپارچه سازی و حذف فاصله های هوایی^۲ احتمالی)، از واتر جت استفاده شد. آنها نتیجه گرفتند عواملی چون تضعیف سیگنال، پیچیدگی هندسه نازل، بی ثبات بودن محرک ولتاژ، اختلاف در فاصله بین نازل و کف ظرف به خاطر نامرتب بودن کف ظرف باعث بروز خطا در تشخیص اشیای خارجی می شوند.

طعم دهنده و ترکیبات طبیعی از رنگ و طعم های مصنوعی در تولید محصولات خود استفاده می کنند. مطابق استاندارد استفاده از هرگونه شیرین کننده مصنوعی، طعم دهنده مصنوعی، رنگ مصنوعی و نگهدارنده در نوشیدنی های میوه ای غیرمجاز است. در بعضی محصولات مثل آب لیمو گاهاً در تولید آن اصلاً لیمویی استفاده نمی شود و عملاً با استفاده از اسانس و اسید مبادرت به تهیه آن می کنند. همچنین در محصولاتی با ارزش مانند روغن زیتون، متقلبان با مخلوط کردن آن با روغن های ارزان قیمتی همچون پالم و روغن نباتی معمولی و یا روغن تفاله زیتون سودهای زیادی را کسب می کنند. جورج و همکاران [۵۱] در سال ۲۰۱۷ توانستند تقلب در روغن^۱ VCO (روغن نارگیل) را به وسیله فراصوت تشخیص دهند. آنها روغن های نارگیل با خلوص های ۵ تا ۱۰۰ درصد (ترکیب شده با روغن های پالم و روغن آفتاب گردان) را تهیه و خصوصیات فراصوتی آنها را بررسی نمودند و با آموزش سامانه توانستند درصد تقلب روغن را به دست آورند. آنها از مبدل یک مگاهرتزی

جدول شماره ۲: چند نمونه از مهمترین پژوهشهای تعیین کیفیت با فراصوت

منبع	حالت	فرکانس	نتیجه	ماده غذایی
George et al., 2017	Pulse-echo	1 MHz	تشخیص تقلب	روغن نارگیل
William A. Cooke, 2016	Pulse-echo	100 Hz	تاثیرگذاری دما، طول زنجیره کربنی، شکل مولکولی و نیروی بین مولکولی روی پارامترهای فراصوتی	چند مایع (آب، آب نمک، الکل و..)
Alouache et al., 2015	Pulse-echo	2.25 MHz	تعیین ویژگی های روغن زیتون	روغن زیتون
Morrison & Abeyratne, 2014	Pulse-echo	100 kHz	تعیین کیفیت میوه	پر تقال
معمار دستجردی و همکاران، ۱۳۹۳	Pulser-receiver	75 kHz	تعیین میزان رسیدگی میوه	هلو
Jivanuwong, 1998	Pulser-receiver	50 kHz	تشخیص پوکی	سیب زمینی
Izbaim et al., 2010	Pulser-receiver	5 MHz	تعیین زمان و دمای سرخ کردن، درجه هیدروژناسیون	روغن سرخ کردنی (USBO, PHSBO)
Abonajmi et al., 2009	Pulser-receiver	150 kHz	تعیین تازگی تخم مرغ	تخم مرغ
Mizrach 2007	No data	50 kHz	تعیین سفتی و TSS ^۳	گوجه فرنگی
Cañizares-Mac'ias et al., 2004	No data	20 kHz	تعیین پایداری اکسیداسیون	روغن زیتون
Probert and Shannon 2000	Pulse-echo	2 MHz	تعیین نقاط تمرکز چربی در ماهی	ماهی تازه

¹ Virgin Coconut Oil

² Air Gap

³ Total soluble solids

۴- چالش های روش فراصوتی

روش فراصوتی مزایای زیادی دارد؛ این روش سریع، دقیق، غیرمخرب و غیرتهاجمی است. همچنین این روش می تواند به آسانی برای اندازه گیری برخط^۱ کالیبره شود که کمک مهمی در عملیات بازرسی فرآوری مواد غذایی می تواند ایفا نماید. یکی از اصلی ترین معایب این روش، افزایش دما به علت جذب انرژی^۲ می باشد که به اثر حرارتی معروف است^۳. عیب دیگر کاویتاسیون است که اثر غیر حرارتی^۴ می نامند؛ حباب های کوچک هوا در نمونه می تواند امواج فراصوتی را تضعیف و مانع از عبور موج گردد[۵۳]. این مشکل گاهی اوقات با انتخاب روش انعکاس (پالس-اکو)^۵ به جای روش ارسال-دریافت^۶ قابل حل می باشد. پدیده ی کاویتاسیون همان طور که در بعضی موارد مانع از حصول کیفیت بالای کار می گردد، گاهی اوقات می تواند بسیار مفید باشد و یا به طور عمدی ایجاد گردد. سامانه های شستشوی عمقی با فراصوت^۷ از موارد دیگری است که از این پدیده ی کاویتاسیون بهره می گیرد و در شستشوی های خاصی که نیاز به دقت و کیفیت بالا دارد، مثل شستشوی مدارهای الکترونیک و یا شستن قسمت های داخلی محصولات کشاورزی همچون کاهو و کرفس که قابل دسترس نمی باشند، به کار می رود. همچنین اطلاعات زیادی درباره ی خواص ترموفیزیکی (مثل دانسیته، تراکم پذیری، ظرفیت گرمایی و انتقال حرارت) ماده ی مورد آزمون به منظور تعیین خواص فراصوتی آن، مورد نیاز است. مساله ی مهمی دیگری که در هنگام استفاده از سامانه های فراصوتی باید دقت نمود عدم عبور امواج فراصوت از هوا و نیاز به یک ماده واسط^۸ برای عبور موج فراصوتی از نمونه مورد آزمون میباشد. (در سامانه های فراصوتی Air Coupled این مشکل مطرح نمیباشد)[۵۴]. سامانه های تشخیصی فراصوتی نیاز به یک واسط جهت یکپارچه نمودن سنسور با ماده ی مورد آزمون دارند، جهت این اتصال می توان از روغن [۳۵]، آب [۱۷ و ۵۲] و غیره استفاده نمود. علت استفاده از

این روش امکان وجود هوا در محل اتصال پراب فراصوتی با ماده مورد آزمون می باشد. در آزمون های تشخیصی فراصوت بایستی دقت نمود که دمای ماده ی مورد آزمایش ثابت نگه داشته شود و در صورتی که دما تغییر نمود بایستی با محاسبه و اعمال ضرایب در نتایج حاصل شده، اصلاحات لازم را اعمال نمود. زیرا خواص فراصوتی مواد متناسب با تغییر دما دچار تغییر می شوند و نادیده گرفتن این مورد ممکن است نتیجه گیری اشتباه را موجب گردد. بیشترین نوع استفاده از فراصوت تشخیصی روش پالس-اکو می باشد. در این روش فرستنده و گیرنده یکی بوده و در یک طرف ماده ی مورد آزمایش قرار می گیرد. پراب فراصوت پس از ارسال موج به ماده، امواج برگشتی را دریافت می کند و سامانه با مقایسه امواج ارسالی و دریافت شده، خصوصیات فراصوتی ماده را تشخیص می دهد. در این حالت ممکن است امواج برگشتی چندین بار بازتاب نموده و ایجاد همپوشانی و خطا نمایند. جهت به حداقل رساندن و کاهش این خطا، جورج و همکاران [۵۱] با تغییر دادن و به حد بهینه رساندن فاصله ی طی شده توسط موج در داخل ماده ی مورد آزمون (اندازه ی L2 در شکل شماره ۴)، نتیجه ی مطلوبی کسب نمودند.

۵- نتیجه گیری

کیفیت و ایمنی مواد غذایی پارامتر بسیار مهم در انتخاب و خرید و مصرف مواد غذایی از جانب مشتریان بوده و افزایش کیفیت و عدم وجود تقلب در محصولات کشاورزی و دامی و فرآورده های آن ها از جانب تولید کنندگان و فروشندگان، ارتباط مستقیمی با مقدار و حجم فروش آن ها خواهد داشت. پژوهش های صورت گرفته نشان می دهد، فراصوت می تواند به عنوان یک روش قدرتمند برای بازرسی مواد غذایی و کشاورزی به کار رود. دامنه کاربرد فراصوت تشخیصی در کیفیت سنجی صنایع غذایی از تعیین رسیدگی و زمان صحیح برداشت میوه تا تشخیص مقدار و اندازه ی اشیای خارجی در داخل مواد غذایی بسته بندی

1 Online

2 energy absorption

3 Thermal effect

4 Non-thermal effect

5 Pulse-echo

6 Pulser-receiver

7 Deep washing

8 Couplant

onditions (pp. 317– 380). New York: John Wiley & Sons - Inc. and Spektr um Akademischer Verlag.

[14] Buckin, V., O'Driscoll, B., Smyth, C., Alting, A. C., & Visschers, R. W. (2003). Ultrasonic spectroscopy for materials analysis: Recent advances. *Spectroscopy Europe*, 15(1), 20-25.

[15] Ernest Bernat-Maso, Elitsa Teneva, Christian Escrig and Lluís Gil. (2017). Ultrasound transmission method to assess raw earthen materials. Volume 156, Pages 555-564

[16] Benedito J, carcel J A, Gonzalez R and mulet A (2002). Application of low intensity ultrasonics to cheese manufacturing processes', *Ultrasonics*, 40, 19–23.

[17] Haeggstrom E. and Luukkala M. (2001). 'Ultrasound detection and identification of foreign bodies in food products', *Food Control*, 12, 37–45.

[18] Zhao, Bosen. Basir, Otman A. and Mittal, Graves.S. (2009). Detection of occluded small objects in glass bottles filled with beverages via ultrasound center frequency tracing. *LWT-Food Science and Technology* 42:162-167

[19] Otman. A. Basir and B. Zhao (2004). Detecting foreign bodies in food. Chapter 12 *Ultrasound*. 204-223.

[20] Miralles, R., Jover-Andreu, M. and Bosch, I. (2006). Morphological image processing for echo detection on ultrasonic signals: an application to foreign bodies detection in the alimentary industry. Proceedings of the 14th European Signal Processing Conference, p.1-4. Florence, Italy.

[21] Meftah, Hrairi. and Mohd Azimin, Elias. (2012). Detection of foreign bodies in canned foods using ultrasonic testing. *International Food Research Journal* 19(2): 543-546.

[22] Laugier, P. and Hayat, G. (2011). Introduction to the physics of ultrasound. *Bone Quantitative Ultrasound* Ed. 468pp Springer

[23] Ashokkumar, M. and Mason, T.J. (2007). Sonochemistry IN Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley and Sons Inc.

[24] Ginesu, G., Giusto, D. D., Märgner, V. and Meinschmidt, P. (2004). Detection of Foreign Bodies in Food by Thermal Image Processing. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 51: 480-490.

[25] Musielak, G., Mierzwa, D., & Kroehnke, J. (2016). Food drying enhancement by ultrasound—A review. *Trends in Food Science & Technology*, 56, 126-141.

[۲۶] آصفی، نارملا؛ جعفریان، پریسا، (۱۳۹۱). اثر هموزنیزاسیون با روش فراصوت در ظرفیت نگهداری آب ماست. فصلنامه علمی پژوهشی

علوم غذایی و تغذیه. دوره ۱۰، بهار ۹۲ - شماره پیاپی ۳۸

[27] Kentish, S., & Feng, H. (2014). Applications of power ultrasound in food processing. *Annual review of food science and technology*, 5, 263-284.

[28] Ferrario, M., Alzamora, S. M., & Guerrero, S. (2015). Study of the inactivation of spoilage microorganisms in apple juice by pulsed light and ultrasound. *Food microbiology*, 46, 635-642.

[۲۹] نجف نجفی، مسعود؛ رسول کدخدایی و سیدعلی مرتضوی، (۱۳۸۷). بررسی عوامل مؤثر بر تشکیل و ثبات نانوامولسیون O/W

تولید شده با امواج فراصوت، هجدهمین کنگره ملی علوم و صنایع غذایی، مشهد، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی خراسان رضوی

[30] Goula, A. M., Papatheodorou, A., Karasavva, S., & Kaderides, K. (2018). Ultrasound-assisted aqueous enzymatic extraction of oil from pomegranate seeds. *Waste and Biomass Valorization*, 9(1), 1-11

شده و کیفیت گوشت یا تخمین تازگی تخم مرغ و.. به صورت غیرمخرب و در کمترین زمان قابل حصول باشد. نتایج نشان می‌دهد فراصوت برای ارزیابی و تشخیص کیفی محصولات کشاورزی - مواد غذایی با بیشترین دقت و در کمترین زمان جایگزینی مطمئن نسبت به روش‌های پر هزینه موجود باشد.

۶- منابع

[1] Abdolabbas Jafari, Atefeh Fazayeli, Mohammad Reza Zarezadeh (2014). Estimation of orange skin thickness based on visual texture coarseness. *Biosystems engineering* 117, 73-82

[2] Aboonajmi, M. A. Akram, T. Nishizu, N Kondo, SK Setarehdan, A. Rajabipour (2010). An ultrasound based technique for the determination of poultry egg quality. *Research in Agricultural Engineering* 56 (1), 26-32

[3] Zarezadeh M. R. Abounajmi M. (2018). Detection of foreign bodies in processed food and beverage by means of ultrasound. International Conference of Agricultural Engineering, CIGR-AgEng. Antalya, Turkey.

[4] Su Won Park, Soo Jin Lee, You Sin Sim, Jin Young Choi, Eun Young Park and Bong Soo Noh. (2017). Analysis of ethanol in soy sauce using electronic nose for halal food certification. *Food Sci. Biotechnol.* 26(2): 311-317

[5] Wentao Zhang, Jishuang Chen, Lemma Dadi Bekele, Yiliang Liu, Gregory Joseph Duns, Leilei Jin. (2016). Physical and Mechanical Properties of Modified Wheat Straw-Filled Polyethylene Composites *BioResources* Vol. 11, No 2

[6] ابونجمی، محمد. (۱۳۹۴). آزمون‌های غیرمخرب و کاربرد آن در صنایع غذایی و کشاورزی. نشریه علمی - ترویجی انجمن بازرسی غیرمخرب ایران - سال اول - شماره ۱.

[7] Aboonajmi, M., Jahangiri, M., & Hassan-Beygi, S. R. (2015). A Review on Application of Acoustic Analysis in Quality Evaluation of Agro-food Products. *Journal of food processing and preservation*, 39(6), 3175-3188

[8] Kamruzzaman M. ElMasry G. Sun D.W. and Allen P. (2012). Nondestructive Prediction and Visualization of Chemical Composition in Lamb Meat Using NIR Hyperspectral Imaging and Multivariate Regression. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 16: 218-226.

[۹] بیگ‌محمدی ز. (۱۳۹۰). تقلبات مورد استفاده در صنایع غذایی و روش‌های شناسایی آن‌ها. اولین سمینار ملی امنیت غذایی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد سوادکوه. اردیبهشت ۱۳۹۰. صفحات ۲۸ تا ۲۹.

[10] Abolghasemi, R., B. Emadi, M. H. Aghkhani, and S. H. Beiraghi Toosi. (2009). Determination of peach maturity using ultrasonic waves. *Journal of Food Science and Technology Research* 5: 63-74.

[11] Rao, M.A.; Rizvi, S.S.H.; and Datta A.K. (2005). *Engineering properties of foods* (3rd ed.), CRC Press.

[12] McClements D. J. (1995). 'Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing', *Trends in Food Science & Technology*, 6, 293–9.

[13] Mason T.J., Luche J.L. (1996). Ultrasound as a new tool for synthetic chemists. In R. Van Eldik & C.D. Hubbard (Eds.). *Chemistry under extreme or non-classical*

- [48] Aboonajm, Mi., S.K.Setaredan, T.Nishizu, N.Kondo. (2014). Prediction of Poultry Egg Freshness Using Ultrasound. *International Journal of food properties*.17 (9), 1889-1899:
- [49] Kertesz, I., Simon, N., Kaszab, T., Muha, V. Z., & Felfoldi, J. (2015). Ultrasonic Method for Cheese Quality Evaluation. In 2015 ASABE Annual International Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- [50] Singh, V. R., & Dwivedi, S. (1995). Ultrasonic detection of adulteration in fluid foods. *Proceedings RC IEEEEMBS & 14th BMESI* (pp. 1.73-1.74).
- [51] George, T., Rufus, E., & Alex, Z. C. (2017). Artificial Neural Network Based Ultrasonic Sensor System For Detection Of Adulteration In Edible Oil. *Journal of Engineering Science and Technology*, 12(6), 1568-1579.
- [52] Zhao, B., Basir, O. A., & Mittal, G. S. (2003). Detection of metal, glass and plastic pieces in bottled beverages using ultrasound. *Food Research International*, 36(5), 513-521.
- [53] Barnett., SB, Ter Haar GR, Ziskin MC, Rott H-, Duck FA, Maeda K. (2000). International recommendations and guidelines for the safe use of diagnostic ultrasound in medicine. *Ultrasound Med Bio*; 26: 355-366.
- [54] Fathizadeh Z. and Aboonajmi M. (2017). Nondestructive Air-coupled Ultrasound Measurement in the Food Industries *Proceedings of the 4th Iranian International NDT Conference Feb 26-27, 2017, Olympic Hotel, Tehran, Iran*
- [55] Jimenez, N., Picó, R., Camarena, F., Redondo, J., & Roig, B. (2012). Ultrasonic evaluation of the hydration degree of the orange peel. *Postharvest biology and technology*, 67, 130-137.
- [56] Cooke, W. A. (2016). *Development of Ultrasonic Techniques for Characterization of Liquid Mixtures*
- [57] Ikeda, T.; Yoshizawa, S.; Koizumi, N.; Mitsuishi, M.; Matsumoto, Y. (2016). *Focused ultrasound and Lithotripsy. In Therapeutic Ultrasound; Springer: Cham, Switzerland, pp. 113-129.*
- [۵۸] معمار دستجردی رسول، مینایی سعید، خوش تقاضا محمدحادی، (۱۳۹۱). کیفیت سنجی میوه گلابی رقم شاه میوه به صورت غیر مخرب با استفاده از امواج فراصوتی. *نشریه ماشین های کشاورزی، نیمسال دوم، دوره ۴، شماره ۲.*
- [31] Dolatowski, Z. J., Stadnik, J., and Stasiak, D. (2007). Applications of Ultrasound in Food Technology. *Acta Sci. Pol., Technol. Aliment.* 6(3) 2007, 89-99.
- [32] Shung K. K., Smith M B and Tsui B M W (1992) *Principles of Medical Imaging*, San Diego, and Academic Press, 85-91.
- [33] Birks A. S. and green r e (1991) *Ultrasonic Testing (Nondestructive Testing Handbook)*, 2nd ed, American Society for Nondestructive Testing, 256-62, 326-7 and 837-40.
- [34] Onda Corporation, currently Onda Corporation/Specialty Engineering Associates, website: <http://www.ultrasonic.com/> (2003)
- [35] Kaye G. W. C. (1986). *Tables of Physical and Chemical Constants and Some Mathematical Functions*, New York, Longman, 76.
- [36] Wang H-F, Jiang W-H and Cao W-W (1999). 'Characterization of lead zirconate titanate piezoceramic using high frequency ultrasonic spectroscopy', *J. Appl. Physics*, 85(12), 8083-91.
- [37] Mizrach A. and Flitsanov U. (1999) 'Nondestructive ultrasonic determination of avocado softening process', *Journal of Food Engineering*, 40, 139-44.
- [38] Benedito J., carcel J., Gisbert M. and Mulet A. (2001). 'Quality control of cheese maturation and defects using ultrasonics, *Journal of Food Science*, 66, 100-4.
- [39] Alouache, B., Khechena, F. K., Lecheb, F., & Boutkedjirt, T. (2015). Characterization of olive oil by ultrasonic and physico-chemical methods. *Physics Procedia*, 70, 1061-1065
- [40] Sarkar, N., Wolfe, R., (1983). Potential of ultrasonic measurements in food quality evaluation. *Trans. ASABE* 26 (2), 624-629.
- [41] Povey, M., (1998). *Ultrasonics of food. Contemp. Phys.* 39 (6), 467-478.
- [42] Mizrach, A. (2008). Ultrasonic technology for quality evaluation of fresh fruit and vegetables in pre- and postharvest processes. *Postharvest Biology and Technology*, 48(3), 315-330.
- [43] Cooke, W. A. (2016). *Development of Ultrasonic Techniques for Characterization of Liquid Mixtures*
- [44] Morrison, D. S., & Abeyratne, U. R. (2014). Ultrasonic technique for Nondestructive quality evaluation of oranges. *Journal of Food Engineering*, 141, 107-112.
- [45] Jivanuwong, S. 1998. *Nondestructive Detection of Hollow Heart in Potatoes Using Ultrasonics*. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [46] Ghaedian, R., Coupland, J. N., Decker, E. A., & McClements, D. J. (1998). Ultrasonic determination of fish composition. *Journal of Food Engineering*, 35(3), 323-337.
- [47] Ghaedian, R., Decker, E. A., & McClements, D. J. (1997). Use of ultrasound to determine cod fillet composition. *Journal of Food Science*, 62(3), 500-504.

Diagnostic Ultrasound, a Nondestructive Approach for Quality Evaluation of Agro-food Products

Mohammad Reza Zarezadeh¹, Mohammad Aboonajmi¹

¹ Department of Agro-technology, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract:

There are many approaches to food quality and safety evaluation and adulteration detection of agro-food products. These ways include destructive and Nondestructive. After Nondestructive tests, foods can be used and also we can apply all experiment case study for testing but in destructive test we can test just a few samples. Ultrasound is one of Nondestructive tests which can use in quality evaluation and fraud detection of agricultural, livestock and poultry products. Also from detection of foreign body in packaged and canned foods to microbial contaminant detection by ultrasound technique is available. Diagnostic ultrasound in food science is fast, low cost, portable and easy to learn. In this work, evaluation and application of diagnostic ultrasound has been classified in three parts which include: a. agricultural products b. livestock and poultry products and c. vegetable oils, juices and other drinking. At the end on paper challenge and some difficulties in ultrasound are given and some problems for solve and reduction of these challenges are given.

Keywords: Nondestructive test, Ultrasound, food, Quality evaluation

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].

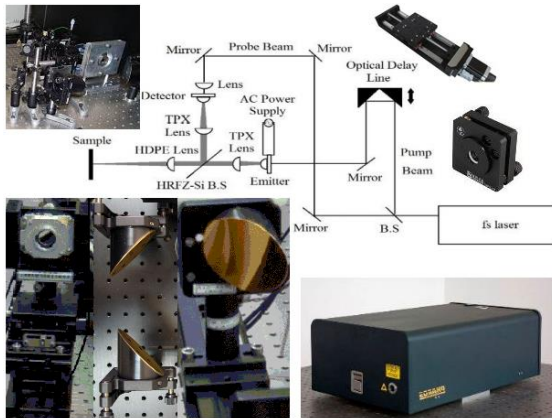
زمان سوییج روشن، تابع طول پالس لیزر بوده و زمان سوییج خاموش، عمدتاً توسط عمر حامل‌های برانگیخته شده

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 فرسرخ 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

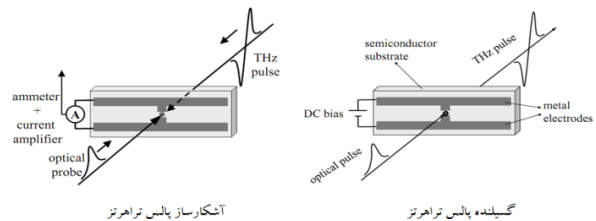
¹ Low Temperature Gallium Arsenide crystal

² THz time-domain spectroscopy

³ Sample Signal

⁴ Reference Signal

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].



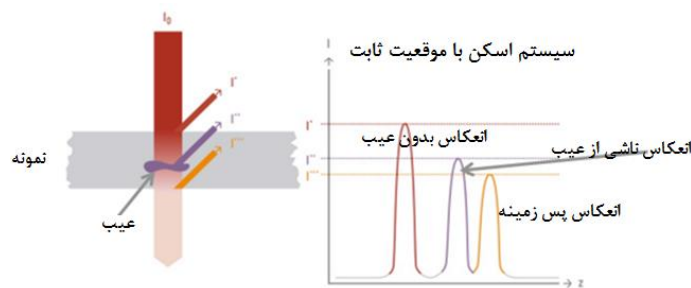
شکل ۱- نمای گسیلنده و آشکارساز پالس تراهرتز [۴]

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

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.



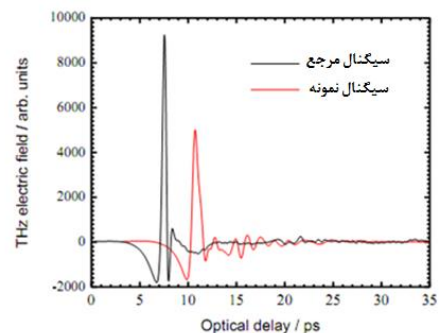
شکل ۳- نحوه‌ی تشخیص عیب در یک نمونه از مقایسه‌ی سیگنالهای مرجع و نمونه برای یک بافت خاص [۸]

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

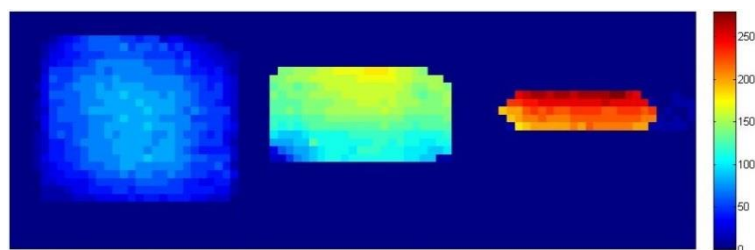
² ZrO₂

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.

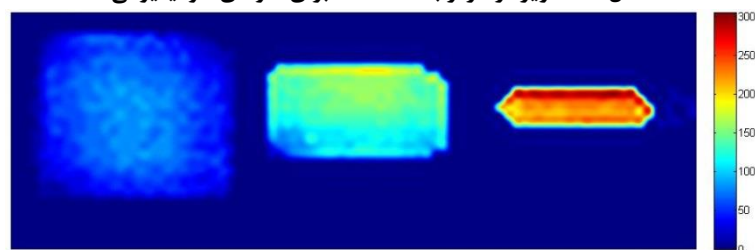
تفکیک پذیری تصویر با گام اسکن نمونه رابطه‌ی مستقیم دارد، هرچه گام اسکن کوچکتر باشد ابعاد پیکسل تصویر کوچکتر و در نتیجه تفکیک پذیری آن بالاتر است. از طرفی اسکن نمونه با گام کوچک زمان انجام آن را به صورت نمایی افزایش می‌دهد. در اینگونه موارد بایستی نسبت زمان انجام آزمون و دقت مورد انتظار از آن را بهینه‌سازی 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.

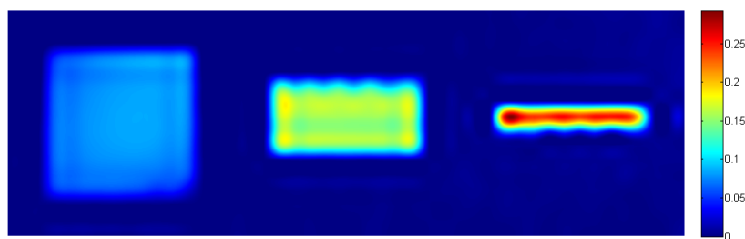
در انتخاب بافتهای نمونه برای الگوسازی به اختلاف خصوصیات ذاتی نمونه ها و تاثیر آنها بر امواج تراهرتز دقت شد. نمونه‌ی آلومینیومی، امواج را تا ۹۸ درصد بازتابانده و عیوب سطحی در آن بررسی گردید در حالی که نمونه های پلکسی گلس نسبت به تابش تراهرتز شفاف بوده و در آنها بنابر تغییر ضریب شکست، عیوب عمقی شناسایی 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



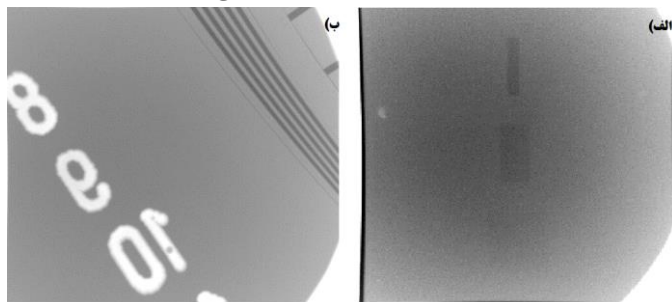
شکل ۴- تصویر تراهرتز بدست آمده برای نمونه‌ی آلومینیومی



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

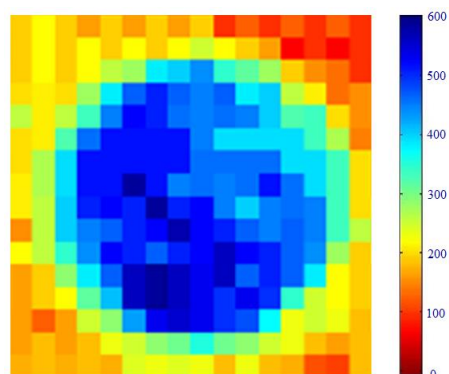
با توجه به عبور امواج تراهرتز و اختلاف مسافت طی شده توسط آن از آنتن تا آشکارساز برای هر یک از نقاط اسکن شده‌ی نمونه و همچنین تغییر ضریب شکست در عبور از لایه های مختلف و همچنین ترکهای سطحی و عمقی (هوا) با ضریب شکست تقریبی ۱ نسبت به ضریب شکست سرامیک با ضریب شکست تقریبی (۲/۵) موقعیت و میزان ترک یا لایه 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 درونمایی 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

روش 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 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

اندازه‌گیری غیرمخرب تنش پسماند با روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی

پیمان قاسمی تمامی^۱، داود اکبری^{۲*}، فرید آزادی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

^۲ استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

* daakbari@modares.ac.ir

چکیده

در این مقاله بررسی روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و ارایه روش جدید برای اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات مکانیکی به صورت غیرمخرب انجام شده است. در این راستا با هدف اثبات علمی روش جدید معرفی شده به مرور کارهای مرتبط با ایده مطرح شده در این پژوهش و بیان جزئیات آن پرداخته شده است. در ابتدا اصول روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و روشهای مورد نیاز برای محاسبه ضرایب همبستگی بیان شده است. با هدف ارزیابی صحت خروجی‌های روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی، با ساخت تجهیزات مورد نیاز و انجام تستهای تجربی برای انجام فرآیند، به مقایسه نتایج خروجی آزمون روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و نتایج شبیه‌سازی المان محدود پرداخته شده است. در ادامه به بیان روش پیشنهادی برای اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات مکانیکی با اعمال بار در ناحیه الاستیک و به صورت غیرمخرب پرداخته شده است. رابطه معرفی شده که بر پایه قانون هوک استوار می‌باشد، قابلیت ارزیابی و محاسبه تنش پسماند به صورت غیرمخرب، تمام صفحه و با دقت بالا را دارا می‌باشد. برای اثبات علمی روش معرفی شده، نمونه‌های فولادی توسط فرآیند SMAW جوشکاری شده‌اند و میزان تنش پسماند موجود در قطعات محاسبه شده است.

واژگان کلیدی: روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی، اندازه‌گیری تنش پسماند، آزمون غیرمخرب، جوشکاری SMAW

۱- مقدمه

پسماند کششی وجود داشته باشد و بارگذاری نیز تنش کششی باشد، سطح تنش در آن منطقه بالاتر از آنچه که تنها با لحاظ تنش کششی خارجی بدست می‌آید خواهد بود. لذا در صورتی که تنش کششی پسماند داخلی در نظر گرفته نشود و قطعه تنها بر اساس تنش اعمالی طراحی شود، ممکن است در اثر تنش‌های پسماند خارجی، تنش در قطعه از حد تسلیم آن بالاتر رفته و باعث شکست آن گردد. در طی سالیان اخیر روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در قطعات ارایه شده است. به طور کلی روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند به غیرمخرب^۱، نیمه مخرب^۲ و مخرب^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های مخرب و نیمه مخرب به علت تخریب ساختار قطعه اولیه در فرآیند ارزیابی تنش پسماند دارای محدودیتهایی می‌باشند. به همین علت استفاده از روش‌های با دقت بالا و غیرمخرب در

تنش پسماند از زمان‌های پیشین موضوعی مهم برای صنعتگران بوده است. در زمان گذشته ساختن قطعات پیچیده رسی با استفاده از آتش هنر محسوب می‌شد که تعادل بین گرادیان کاهش تنش پسماند و دستیابی به شکل مورد نظر از محصولات را در بر داشت. گاهی وجود تنش پسماند در قطعه تولید شده سبب ایجاد انقباض و اعوجاج در آن می‌شود که مطلوب نیست. در عین حال بسیاری از طراحی‌ها وابسته به تنش پسماند است. به ویژه مواد شکننده و ترد می‌توانند از طریق تنش‌های پسماند فشاری مقاوم‌تر شوند. علت اهمیت شناسایی تنش‌های پسماند به این دلیل است که وقتی جسم تحت تنش خارجی قرار می‌گیرد، این تنش خارجی به تنش پسماند موجود افزوده می‌شود. پس اگر در منطقه‌ای تنش

¹ Non-destructive

² Semi destructive

³ Destructive

جابجایی و کرنش در حین انتقال محاسبه می‌شود تا با موقعیت زیرمجموعه‌ها در شرایط فعلی مطابقت داده شود. نتیجه نهایی یک شبکه شامل اطلاعات جابجایی و کرنش با توجه به اطلاعات پیکربندی مرجع می‌باشد. در روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی، شدت نور هر عکس با یک تابع چند جمله‌ای پیوسته تخمین زده می‌شود. ساتن و همکاران طی مقاله‌ای نشان دادند که منحنی درجه ۵ بهترین نتایج را نشان می‌دهد. الگوریتم برهمنگاری هر بار تابع شدت نور دو زیرناحیه از دو تصویر قبل و بعد از بارگذاری با ابعاد $N \times N$ پیکسل را با هم مقایسه کرده و آن زیرناحیه از عکس بعد از بارگذاری را که بیشترین تطابق با زیرناحیه عکس مرجع دارد، به عنوان زیرناحیه تغییر یافته در نظر گرفته و جابجایی و تغییرشکل‌های آن را به دست می‌آورد (مطابق شکل ۲). این روند برای تمامی زیرناحیه‌های تصویر مرجع انجام شده و در نهایت میدان جابجایی کل به دست می‌آید. برای بررسی میزان انطباق هر جفت زیرناحیه ضریب برهمنگاری C به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود که می‌تواند معیار مناسبی برای درک مقدار مطابقت دو زیرناحیه متناظر باشد [۳].

$$C(R) = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} \sum_{j=-m}^{j=m} (G_r(x_p, y_p) - G_d(x'_p, y'_p))^2}{\sum_{i=-m}^{i=m} \sum_{j=-m}^{j=m} (G_r(x_p, y_p))^2} \quad (1)$$

که در رابطه ۱:

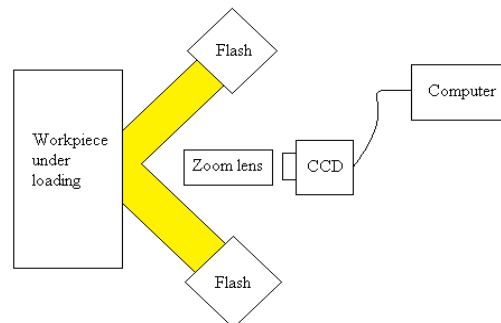
$$\begin{aligned} X_p &= x_p + i \\ Y_p &= y_p + j \\ X'_p &= x_p + i + U_s(i, j) \\ Y'_p &= y_p + j + V_s(i, j) \end{aligned}$$

و R بردار مجهولات به صورت زیر می‌باشد:

$$R = (X, Y, U, V, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial y})$$

در معادلات بالا، U و V مولفه‌های جابجایی در مرکز زیرناحیه، G_r و G_d توابع پیوسته درونیایی شدت نور قبل و بعد از بارگذاری می‌باشند. (x, y) و (x', y') به ترتیب مختصات نقاط در زیرناحیه‌های تصویر مرجع و تصویر بعد

صنعت بسیار حایز اهمیت می‌باشد [۱]. امروزه در بین روش‌های غیرمخرب، استفاده از روش‌های نوری که قابلیت ارزیابی تنش پسماند به صورت تمام صفحه^۱ و در موقعیت^۲ را دارا می‌باشند، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این روش‌ها دارای مزایای سرعت بسیار بالا، دقت بالا، هزینه پایین و عدم وابستگی به ریزساختار و کیفیت سطوح می‌باشند. در بین انواع روش‌های نوری، روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی^۳ به علت هزینه پایین، سرعت بالا و عدم نیاز به مواردی نظیر تحلیل فازها، هاله‌ها و امواج نسبت به روش‌های نوری دیگر دارای برتری می‌باشد [۴-۵]. این روش برای اولین بار از سال ۱۹۸۲ در دانشگاه کارولینای جنوبی توسط پروفیسور ساتن برای به دست آوردن میدان جابجایی معرفی شد [۶]. در این روش، ابتدا روی سطح قطعه یک الگوی لکه‌ای سیاه و سفید تصادفی ایجاد می‌شود. بعد از آماده‌سازی نمونه، قبل و بعد از بارگذاری دو عکس از الگوی لکه‌ای سطح قطعه گرفته می‌شود و سپس با تحلیل این دو عکس در الگوریتم برهمنگاری می‌توان میدان جابجایی و کرنش را به دست آورد. شماتیکی از تجهیزات روش برهمنگاری در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱- شماتیکی از تجهیزات DIC

ایده اصلی این روش به این صورت می‌باشد که چگونه بین نقاط قبل و بعد از تغییر شکل در ماده مورد بررسی ارتباط برقرار شود. روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی این کار را با به کارگیری بخش‌های فرعی از عکس مرجع^۴ انجام می‌دهد که به نام زیر مجموعه^۵ شناخته می‌شوند و موقعیت نسبی آنها را تعیین می‌کند. برای هر زیرمجموعه، اطلاعات

¹ Full-field

² In-Situ

³ Digital Image Correlation (DIC)

⁴ Reference image

⁵ Subset

کند، قابل دستیابی است. در الگوریتم روش برهمنگاری، روند جستجو برای محاسبه جابجایی‌ها و گرادیان‌های جابجایی مجهول با گام‌های بلند شروع می‌شود. در این روند، در ابتدا گرادیان جابجایی‌ها صفر در نظر گرفته می‌شوند و الگوریتم با گام‌های ۱ پیکسل در ناحیه مورد نظر جستجو کرده و پیکسلی که ضریب برهمنگاری را به حداقل برساند به عنوان جواب اولیه در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از روش نیوتن-رافسون جابجایی‌ها و گرادیان آن‌ها با دقت کسری از اندازه پیکسل به دست می‌آید. نتایج این مرحله به عنوان مقادیر اولیه در الگوریتم نیوتن-رافسون برای زیرناحیه بعدی استفاده می‌شود [۳]. در این روش با انجام محاسبات کلی در نهایت کرنش‌ها در راستاهای مختلف به صورت روابط ۷-۵ بیان می‌شوند:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{du}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 \right) + \left(\frac{du}{dx} \right) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{du}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dw}{dy} \right)^2 \right) + \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{du}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{du}{dx} \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \frac{dv}{dy} \right) \quad (7)$$

۲- تئوری مساله

قانون هوک در فیزیک، مکانیک و دانش مواد کشسانی یا الاستیسیته، تقریبی است نشان‌دهنده آن که تغییر طول یک ماده با بار وارد بر آن رابطه خطی دارد. بسیاری از مواد تا زمانی که نیرو از حد کشسانی آن‌ها کمتر باشد با تقریب خوبی از این قانون پیروی می‌کنند. بر اساس قانون هوک تنش با کرنش در ناحیه الاستیک دارای رابطه خطی می‌باشد و از طریق رابطه ۸ بدست خواهد آمد [۸-۱۰]:

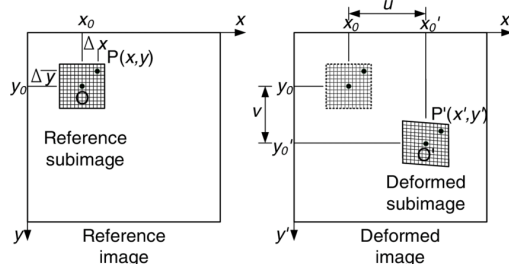
$$\sigma = E\varepsilon \quad (8)$$

که در رابطه ۸، σ تنش، ε کرنش و E مدول یانگ می‌باشد. همانگونه که از رابطه ۸ مشخص شده است، رابطه بین تنش و کرنش در محدوده الاستیک به صورت خطی می‌باشد. بر اساس رابطه هوک چنانچه قطعه‌ای تحت نیروی کششی قرار گیرد و نیروی اعمال شده در حدی باشد که ماده را تا حد الاستیک آن بکشد، میزان کرنش ایجاد شده در تمامی المان‌های آن از طریق رابطه‌ی هوک محاسبه خواهد شد. این موضوع در حالتی که تنش پسماند در قطعه وجود نداشته باشد صادق خواهد بود. ولی چنانچه در قطعه‌ای بر اثر عملیاتی که از قبل بر روی آن انجام شده است تنش پسماند ایجاد شده باشد و این قطعه تحت کشش

از بارگذاری هستند که طبق روابط ۲ و ۳ با همدیگر ارتباط دارند.

$$x' = x + U + \frac{\partial U}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial U}{\partial y} \Delta y \quad (2)$$

$$y' = y + V + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial V}{\partial y} \Delta y \quad (3)$$



شکل ۲- زیرناحیه‌های مرجع و تغییر شکل یافته

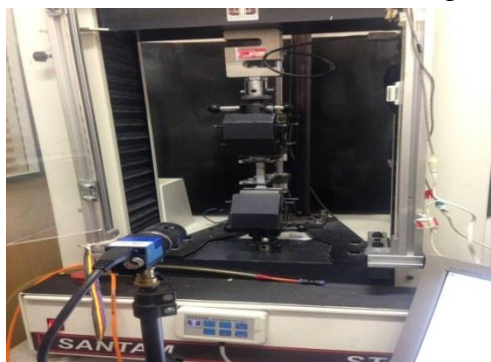
که در روابط ۲ و ۳، Δx و Δy فواصل افقی و عمودی نقطه (x, y) از مرکز زیرناحیه است. در رابطه برهمنگاری، مقدار شدت نور در هر نقطه، از زیرناحیه عکس مرجع با نقطه متناظر آن در زیرناحیه متناظر در عکس بعد از بارگذاری مقایسه شده و اختلاف آن‌ها به دست می‌آید. سپس مقدار مجذور اختلاف آن‌ها بر مقدار مجذور شدت نور آن نقطه در عکس مرجع تقسیم می‌شود. عدد به دست آمده، معیاری از خطای نسبی در آن نقطه است. برای محاسبه مقدار خطای کل در یک زیرناحیه، مقدار خطای نقاط با یکدیگر جمع می‌شوند، وقتی ضریب برهمنگاری صفر شود، در حقیقت تابع خطا در کل زیرناحیه صفر شده و این نشان دهنده تطابق کامل است. بهترین جواب زمانی به دست می‌آید که ضریب $C(R)$ در رابطه ۱ کمینه شود. به تعبیر دیگر، توابع درونیایی قبل و بعد از بارگذاری در هر نقطه اختلاف کمی داشته باشند. طبق رابطه ۴ برای کمینه کردن C باید گرادیان آن صفر شود.

$$\nabla C = \left(\frac{\partial C}{\partial R_k} \right)_{k=1,13} \quad (4)$$

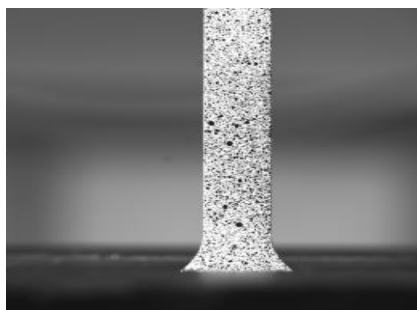
برای حل رابطه ۴ و به دست آوردن ریشه‌های آن، از روش نیوتن-رافسون استفاده می‌شود. این روش از یک مقدار اولیه تقریبی برای پیدا کردن ریشه معادلات استفاده می‌کند و تا زمانی که خطا از مقدار معینی کمتر شود تکرار انجام می‌دهد. از آنجاییکه ضریب برهمنگاری تابعی از مولفه‌های جابجایی و گرادیان آن‌ها است، این مجهولات با جستجوی دسته‌ای از این مولفه‌ها که ضریب برهمنگاری را کمینه

و ضخامت قطعه کار ۳ میلی‌متر می‌باشد. در شکل ۴ یک مرحله عکس‌برداری از قطعه تحت آزمون کشش نمایش داده شده است. این تصویر با استفاده از دوربین سی سی دی^۲ و با فاصله زمانی معین گرفته شده است. الگوی تصادفی ایجاد شده بر روی نمونه با استفاده از اسپری رنگ سفید و مشکی ایجاد شده است.

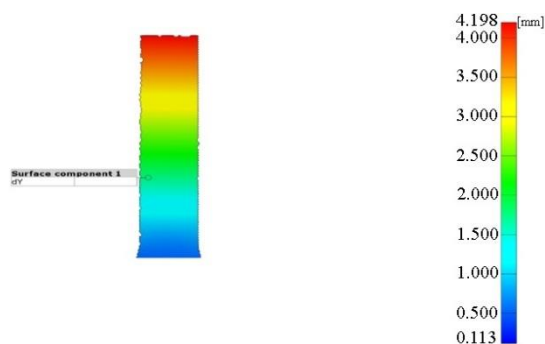
پس از عکس‌برداری از قطعه تحت کشش توسط دوربین CCD، عکس‌های گرفته شده وارد نرم‌افزار پردازش تصویر شده است و میدان جایجایی تجربی محاسبه شده است. کانتور خروجی مرحله اول کشش نرم‌افزار GOM در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۳- تجهیزات برهمنگاری تصاویر دیجیتالی مورد استفاده



شکل ۴- نمونه با الگوی تصادفی



شکل ۵- نتایج حاصل از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی

محوری قرار گیرد، میدان کرنشی ایجاد شده در قطعه کار از حالت یکنواخت متفاوت خواهد بود. در این حالت با استفاده از نمونه‌ی استاندارد قطعه فولادی و انجام تست کشش، مقدار مربوط به مدول یانگ قطعه فولادی محاسبه خواهد شد. طبق قانون هوک رابطه بین تنش فلز پایه σ_b و کرنش فلز پایه ϵ_b از طریق رابطه ۹ محاسبه می‌شود:

$$\sigma_b = E_b \epsilon_b \quad (9)$$

با توجه به رابطه ۹ تنش فلز پایه σ_b برای نمونه با تنش پسماند محاسبه خواهد شد و تنش پسماند در نمونه از رابطه ۱۰ محاسبه خواهد شد:

$$\sigma_R + \sigma_b = E_R \epsilon_R \quad (10)$$

به طوریکه E_R مدول یانگ نمونه با تنش پسماند، ϵ_R کرنش در قطعه با تنش پسماند و σ_R میزان تنش پسماند موجود در قطعه می‌باشد. با توجه به روابط ۹ و ۱۰ میزان تنش پسماند در قطعه از طریق رابطه ۱۱ محاسبه خواهد شد:

$$\sigma_R = E_R \epsilon_R - E_b \epsilon_b \quad (11)$$

۳- مراحل انجام آزمایش

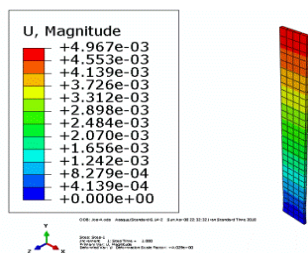
برای اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات جوشکاری شده لب به لب، دستگاه تست کشش سروو الکترومکانیکال سنتام^۱ با ظرفیت ۲ تن به همراه فک دستی WG-20F و اکستنسیومتر کورس بلند ELP500 برای انجام آزمون کشش مورد استفاده قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری میزان جایجایی ایجاد شده در قطعه در حین آزمون کشش از دوربین سی سی دی ۳/۲ مگاپیکسل لایوژن^۲ استفاده شده است. برای کنترل دوربین از نرم‌افزار IC Capture 2.4 استفاده شده است و نتایج تصویر برداری در نرم‌افزار GOM Correlate مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مجموعه مورد استفاده برای روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و کشش در شکل ۳ نمایش داده شده است.

در ابتدا به منظور بررسی میزان دقت تجهیزات مورد استفاده برای آزمون برهمنگاری تصاویر، به انجام تست کشش و شبیه‌سازی فرآیند و مقایسه نتایج به دست آمده با یکدیگر پرداخته شده است. نمونه مورد استفاده برای آزمون کشش دارای طول ۲۰ و عرض ۳ سانتی‌متر می‌باشد

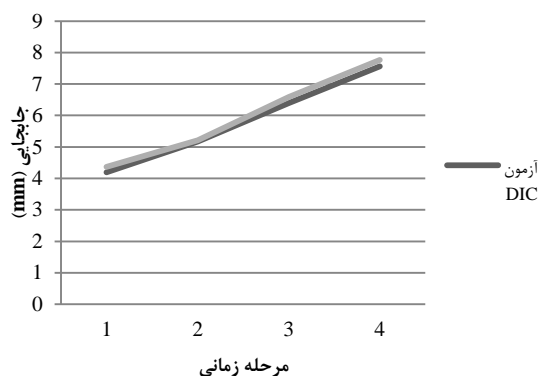
¹ SANTAM STM 20

² Lavision

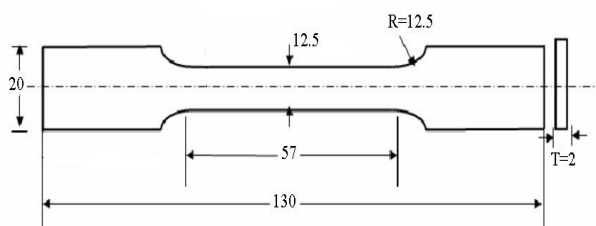
³ Charged Coupled Device (CCD)



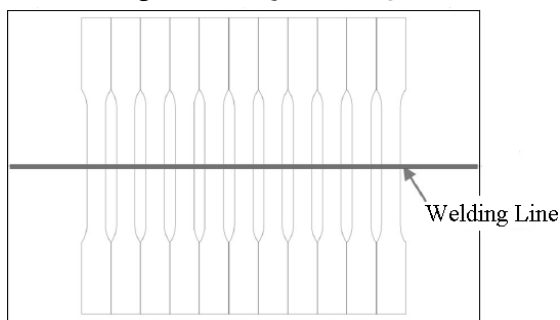
شکل ۶- نتایج شبیه‌سازی المان محدود تست کشش ورق



شکل ۷- مقایسه نتایج خروجی تست تجربی و شبیه‌سازی آزمون کشش نمونه در زمان‌های مختلف تست کشش



شکل ۸- ابعاد نمونه تست کشش



شکل ۹- شماتیک نمونه‌های جوشکاری شده آزمون کشش

پس از انجام تست‌های تجربی، شرایط یکسان آزمایش‌ها در نرم‌افزار المان محدود آباکوس^۱ ورژن ۶.۱۴.۲ شبیه‌سازی شده است. نتایج به دست آمده در دوره‌ی زمانی مشخص تعیین شده است و نمونه آن در شکل ۶ نمایش داده شده است.

با توجه به شکل ۷ و محاسبه درصد خطای بین خروجی‌های نرم‌افزار پردازش تصویر GOM و آباکوس مشخص شده است که میانگین خطا کمتر از ۵ درصد می‌باشد و به دقت کار نرم‌افزار GOM پی برده شده است و صحت این نرم‌افزار نیز مورد تایید قرار گرفته است. با توجه به این امر از این نرم‌افزار برای آزمایش‌های مورد نیاز برای این پژوهش استفاده خواهد شد.

برای انجام تست‌های تجربی، فرآیند جوشکاری قوسی بر روی نمونه‌ها انجام شده است و پارامترهایی نظیر سرعت و جریان جوشکاری برای تمامی نمونه‌ها به طور یکسان در نظر گرفته شده است. به منظور ایجاد تنش پسماند در درون قطعات جوشکاری شده، نمونه‌های تحت فرآیند به طور کامل توسط قیدهایی مهار شده‌اند. نمونه‌های انتخاب شده برای جوشکاری از جنس فولادهای کربنی^۲ انتخاب شده‌اند. خواص مکانیکی این نوع فولاد در جدول ۱ نمایش داده شده است. پس از انجام عملیات جوشکاری قطعات فولادی، تمامی نمونه‌ها بر اساس ابعاد تعیین شده در شکل ۸ بریده شده‌اند و به هندسه مورد نظر برای آزمون کشش رسیده‌اند. در شکل ۹ شماتیکی از قطعات جوشکاری شده پس از عمل برشکاری نمایش داده شده است.

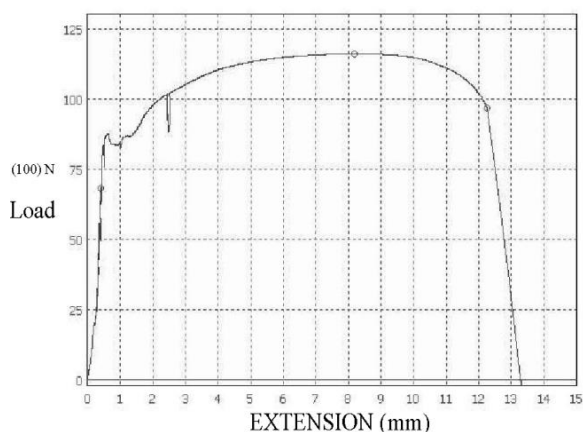
مقایسه نتایج خروجی تست تجربی و شبیه‌سازی آزمون کشش نمونه در زمان‌های مختلف تست کشش مورد ارزیابی قرار گرفته است. به همین صورت شرایط شبیه‌سازی برای زمان‌های مختلف آماده‌سازی شده است. در شکل ۷ مقایسه خروجی جابجایی در تست تجربی و نرم‌افزاری در مراحل زمانی مختلف ارایه شده است.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی فولاد ASTM A36

مشخصات	پارامتر
ASTM A36	نوع ماده
210 GPa	مدول یانگ
0.26	ضریب پواسون
7850 Kg/m ³	چگالی

¹ Abaqus 6.14.2

² ASTM A36



شکل ۱۲- نمودار نیرو- جابجایی فولاد مورد استفاده

در حین انجام آزمون کشش، تغییر شکل ایجاد شده در نمونه جوش داده شده و فلز پایه توسط سیستم برهمنگاری تصاویر دیجیتالی نمایش داده شده در شکل ۳ ثبت شده است. سیستم برهمنگاری تصاویر دیجیتالی بر روی پایه روبروی دستگاه کشش تعبیه شده است. در حین تصویر برداری، سیستم نورپردازی نیز باید به دقت اعمال شود تا کیفیت عکسبرداری افزایش یابد و نتایج با دقت بالاتری بدست آید. میزان تغییر شکل ایجاد شده در نقاط مختلف قطعه بر اساس جابجایی الگوی تصادفی و مقایسه با مقدار مرجع محاسبه خواهد شد. با هدف دستیابی به دقت بالاتر بخش مورد نظر از قطعه برای بررسی در نرم‌افزار به عنوان زیرمجموعه انتخاب شده است. این بخش با اندازه المان ۱۱ پیکسل و فاصله بین نقاط ۷ پیکسل که مطابق با سایز قطعه پیشنهاد شده است، مطابق شکل ۱۳ به صورت رنگی نمایش داده خواهد شد. به منظور بررسی میزان تغییر شکل در راستای مشخص، مسیری مشخص بر روی قطعه تعریف شده است. تعریف مسیر اصولاً در نمای دید قطعه‌کار و در جهت‌های مورد نظر اعمال خواهد شد و نرم‌افزار دارای این قابلیت می‌باشد که در تمامی راستاها نتایج را محاسبه کند. یکی از مسیرهای تعریف شده برای نرم‌افزار در جهت محور x و به صورت خط مشکی در شکل ۱۳ نمایش داده شده است.



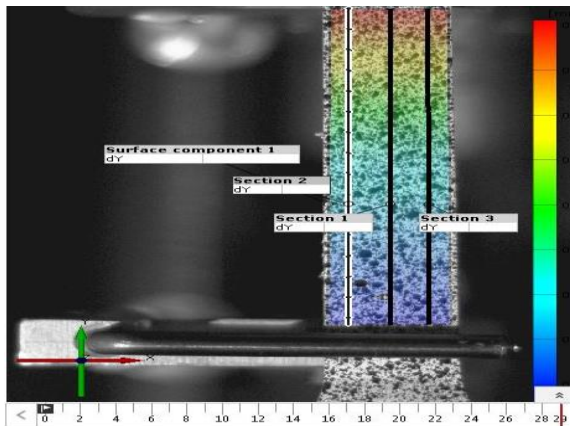
شکل ۱۰- دستگاه وایرکات تخلیه الکتریکی

در این پژوهش دو نوع نمونه آماده‌سازی شده است. نمونه اول از جنس فلز پایه می‌باشد و نمونه دوم از جنس همان فلز پایه می‌باشد که عملیات جوشکاری بر روی آن انجام شده است. تمامی نمونه‌ها توسط دستگاه برش وایرکات تخلیه الکتریکی نمایش داده شده در شکل ۱۰ به ابعاد مورد نظر بریده شده‌اند.

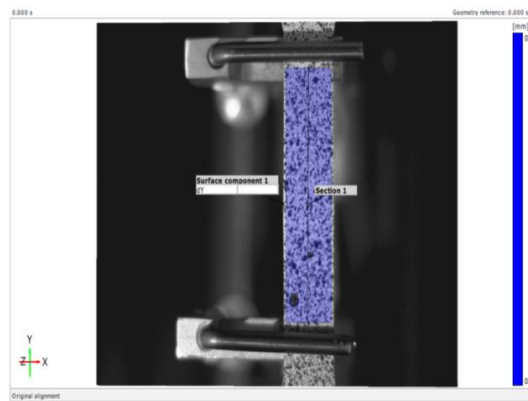
همانگونه که در شکل ۸ نمایش داده شده است، طول کلی نمونه ۱۳۰، طول گیج ۵۷، عرض گیج ۱۲/۵، ضخامت ۲ میلی‌متر و شعاع فیلت نیز ۱۲/۵ می‌باشد. نمونه فلز پایه به منظور تعیین دقیق مشخصات مکانیکی فولاد و تعیین شرایط بارگذاری مورد استفاده قرار گرفته است و تا مرز پارگی تحت آزمون کشش قرار گرفته است. بر اساس منحنی نیرو- جابجایی، حدود الاستیک و پلاستیک قطعه فولادی مشخص شده است. نمونه قبل و بعد کشش و نمودار نیرو- جابجایی قطعه فولادی مورد استفاده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است.



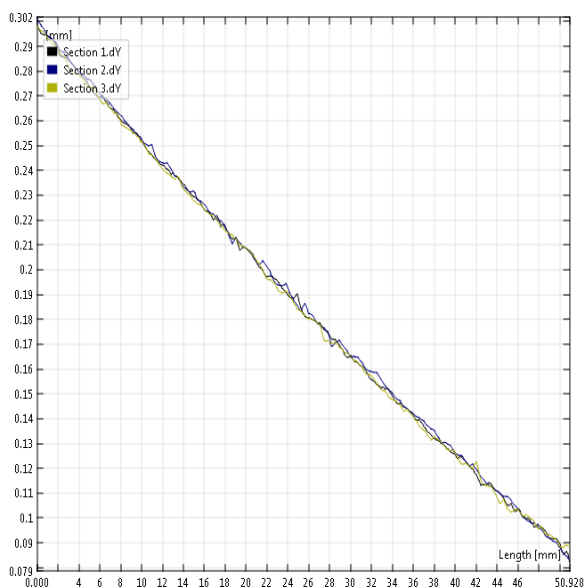
شکل ۱۱- نمونه فلز پایه قبل و پس از آزمون کشش



شکل ۱۴- تعریف مسیر قطعه تحت آزمون کشش

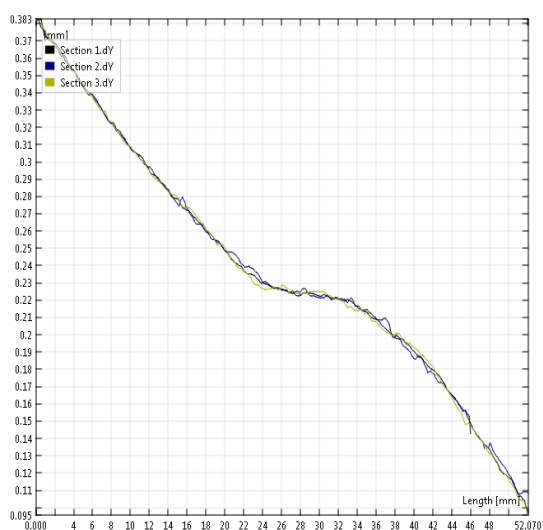


شکل ۱۳- زیرمجموعه و مسیر تعریف شده برای نرم افزار



شکل ۱۵- دیاگرام جابجایی نقاط مختلف نمونه در راستای

مسیر تعریف شده برای فلز پایه



شکل ۱۶- دیاگرام جابجایی نقاط مختلف نمونه در راستای

مسیر تعریف شده برای نمونه جوش داده شده

۴- بحث و تحلیل نتایج

در شکل ۱۲ منحنی نیرو-جابجایی آزمون کشش فلز پایه نمایش داده شده است. با استفاده از این منحنی محدوده الاستیک قطعه مشخص شده است. همچنین به علت مشخص بودن مقادیر نیرو، سطح مقطع و طول اولیه گیج، مدول یانگ قطعه فولادی نیز بدست خواهد آمد. با توجه به محاسبات مقدار مدول یانگ قطعه فولادی 210 GPa محاسبه شده است. در نرم افزار GOM، مطابق شکل ۱۴ سه مسیر برای قطعه تعریف شده است. در شکل های ۱۵ و ۱۶ نتایج بدست آمده برای قطعه فولادی پایه و بعد از جوشکاری نمایش داده شده است. همانگونه که در شکل ۱۵ نمایش داده شده است در نمودار تغییر مربوط به قطعه پایه میزان تغییر شکل در طول مسیرهای تعیین شده ۱، ۲ و ۳ دارای شیب ثابتی می باشد و در طول کل مسیر این شیب تغییر نخواهد داشت. مطابق شکل ۱۶ نمودار تغییر شکل ایجاد شده در طول مسیرهای تعریف شده برای قطعه جوش داده شده دارای شیب یکسان در تمامی طولش نمی باشد. این شیب در نواحی که تحت تاثیر تنش پسماند نمی باشد دارای مقداری ثابت و برابر با فلز پایه می باشد. در نواحی که تحت تاثیر تنش پسماند ناشی از حرارت جوشکاری می باشد، مقادیر جابجایی دارای شیب بسیار کمی در حدود صفر می باشد که این امر ناشی از وجود تنش پسماند موجود در قطعات می باشد. وجود تنش پسماند کششی درون قطعه باعث ایجاد جابجایی های بزرگتر از حد معمول در قطعه تحت کشش می شود. به همین ترتیب چنانچه درون قطعه تنش پسماند فشاری وجود داشته باشد، این تنش باعث مخالفت با ایجاد جابجایی در المان های مختلف خواهد شد.

پس از محاسبه مقادیر جابجایی و کرنش در نمونه‌های جوشکاری شده به محاسبه تنش پسماند در نمونه‌ها پرداخته شده است. مقدار تنش پسماند با توجه به مدول یانگ و میزان کرنش ایجاد شده در نمونه‌های تحت کشش با استفاده از روابط محاسبه خواهد شد. در جدول ۲ مقدار تنش پسماند ایجاد شده در نمونه جوش داده شده با شرایط جوشکاری بیان شده محاسبه شده است.

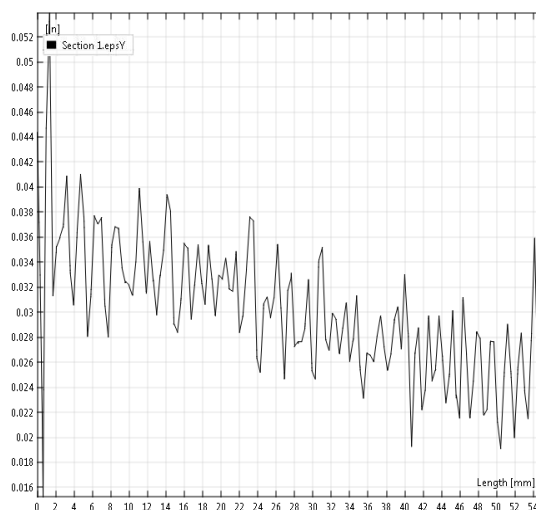
جدول ۲. میزان تنش پسماند ایجاد شده در نمونه جوشکاری شده

پارامتر	نمونه تجربی	نمونه شبیه‌سازی شده
سرعت کشش	2 mm/min	2 mm/min
سطح مقطع عرضی (m ²)	2.5×10 ⁻⁵	2.5×10 ⁻⁵
تنش (MPa)	1638	1654
تغییر شکل (mm)	0.390	0.394
کرنش	0.00780	0.00787
مدول الاستیک (GPa)	210	210
سطح مقطع عرضی (m ²)	2.5×10 ⁻⁵	2.5×10 ⁻⁵
تنش (MPa)	987	996
تغییر شکل (mm)	0.235	0.239
کرنش	0.00470	0.00474
مدول الاستیک (GPa)	210	210

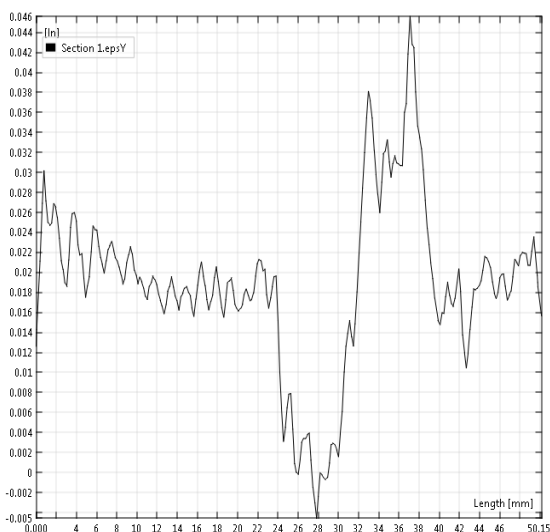
۵- نتیجه‌گیری

با انجام آزمایشات تجربی روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری مشاهده شده است که این روش دارای دقت کافی برای ارزیابی میدان جابجایی، کرنش و تنش را در سطح قطعه کار دارا می‌باشد. برای اندازه‌گیری تنش پسماند به صورت غیرمخرب رابطه ۱۱ بر پایه قانون هوک ارایه شده است که این رابطه با استفاده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند را در کل سطح قطعه کار و به صورت غیرمخرب دارا می‌باشد. به منظور صحت‌سنجی رابطه ارایه شده به شبیه‌سازی قطعه در نرم‌افزار المان محدود پرداخته شده است. مطابق با جدول ۲ و با مشاهده خروجی‌های نرم‌افزار المان محدود و مقایسه آن با نتایج رابطه ارایه شده، نتیجه‌گیری

پس از محاسبه مقادیر جابجایی توسط نرم‌افزار GOM، به بررسی میزان کرنش ایجاد شده بر روی نمونه تحت آزمون کشش پرداخته شده است. در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نتایج کرنش ایجاد شده بر روی نمونه‌ها نمایش داده شده است. با توجه به این شکل‌ها مشخص شده است که کرنش ایجاد شده بر روی نمونه‌ی پایه دارای روند نسبتاً یکسانی می‌باشد و دارای تغییر شکل ناگهانی نمی‌باشد. دلیل این امر یکنواخت بودن ساختار قطعه در تمامی طول مسیر تعریف شده می‌باشد. با توجه به شکل ۱۸ مشخص شده است که میزان کرنش برای نمونه‌ی جوش داده شده در برخی نواحی دارای تغییر شکل ناگهانی می‌باشد. این نواحی مربوط به نواحی دارای تنش پسماند می‌باشد که باعث تغییرات در کرنش ایجاد شده می‌شود.



شکل ۱۷- دیاگرام کرنش نقاط مختلف نمونه در راستای مسیر تعریف شده برای نمونه فلز پایه



شکل ۱۸- دیاگرام کرنش نقاط مختلف نمونه در راستای مسیر تعریف شده برای نمونه جوش داده شده

[5] Huang, X., Liu, Z., & Xie, H. (2013). Recent progress in residual stress measurement techniques. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 26(6), pp. 570-583.

[6] Sutton, M. A., et al. "Determination of displacements using an improved digital correlation method." *Image and vision computing* 1.3 (1983): 133-139.

[7] Hild, F., & Roux, S. 2012. *Digital image correlation*. Wiley-VCH, Weinheim, pp. 183-228.

[8] Bartlett, J. L., Croom, B. P., Burdick, J., Henkel, D., Li, X. (2018). Revealing mechanisms of residual stress development in additive manufacturing via digital image correlation. *Additive Manufacturing*, 22, 1-12.

[9] Kim, K., Jung, H. (2016). Nondestructive testing of residual stress on the welded part of butt-welded A36 plates using electronic speckle pattern interferometry. *Nuclear Engineering and Technology*, 48(1), 259-267.

[10] Kim, K., Choi, T., gyun Na, M., Jung, H. (2015). Residual stress measurement on the butt-welded area by electronic speckle pattern interferometry. *Nuclear Engineering and Technology*, 47(1), 115-125.

شده است که متد معرفی شده دارای دقت بالایی می باشد و می توان با استفاده از آن به همراه روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی به اندازه گیری تنش پسماند در قطعات به صورت غیرمخرب پرداخته شود.

۶- منابع

[1] Shokrieh, M. (2014). *Residual stresses in composite materials*. Woodhead publishing.

[2] Ghasemi Tamami, P., Akbari, D. (2017). Study on defect detection of industrial parts with Digital Image Correlation method, *25th Annual Conference of Mechanical Engineering*.

[۳] قاسمی تمامی، پ.؛ اکبری، د. (۱۳۹۷). توسعه روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی با هدف اندازه گیری تنش پسماند به صورت غیرمخرب، پانزدهمین همایش ملی و چهارمین کنفرانس بین المللی مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس.

[۴] شاه میرزالی، ع.؛ محمدرضا فراهانی، م.؛ اکبری، د. (۱۳۹۵). بررسی اثرات اندازه زیرمجموعه و گام بر دقت اندازه گیری مدول الاستیک به روش تصویربرداری دیجیتال، شانزدهمین کنفرانس بین المللی انجمن های هوافضای ایران، تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

Nondestructive Residual Stress Measurement Using Digital Image Correlation Method

Peyman Ghasemi Tamami¹, Davood Akbari^{*1}, Farid Azadi¹

¹Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract:

In this paper, Digital Image Correlation method (DIC) and the introduction of a new Nondestructive method for measuring residual stresses in mechanical parts has been investigated. In this regard, with the purpose of scientific proof of the proposed new method, a review of the related work to the presented idea and its details has been discussed. Initially, the principles of digital image correlation method and the methods used to calculate correlation coefficients are presented. In order to evaluate the accuracy of digital image correlation method outputs, by construction the required equipment and doing experimental tests, comparing the output results of the digital image correlation method and the simulation results of finite element are discussed. In the following, the proposed method for measuring the residual stresses in mechanical parts by applying loads in the elastic and Nondestructive area has been discussed. The proposed relationship, which is based on Hooke's law, is capable of evaluating and calculating residual stresses in a Nondestructive, full-screen, and high-precision manner. For scientific proof, the steel samples are welded by the SMAW process and the amount of residual stresses found in the parts has been calculated.

Keywords: Digital image correlation method, Residual stress measurement, Nondestructive testing, SMAW welding

بررسی آزمون غیرمخرب فراصوتی در اتصالات چهارورقه‌ای جوش مقاومتی نقطه‌ای و تدوین دستورالعمل کاربردی آن در صنایع خودروسازی

حسن ایزدی^{۱*}، عارف اکبری^۲، رضا مساجدی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، مهندسی مواد- گرایش جوشکاری، شرکت ایران خودرو

^۲ کارشناس، مهندسی تکنولوژی جوشکاری، شرکت ایران خودرو

^۳ کارشناس، مدیریت صنعتی، شرکت ایران خودرو

* mehdiizadi250@gmail.com, h.izadi@ikco.ir

چکیده

فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای یکی از متداولترین و قدیمی‌ترین روشهای جوشکاری الکتریکی است که امروزه به صورت گسترده در صنایع مختلفی به ویژه صنایع خودروسازی، هوافضا، الکترونیک و برخی بخش‌های هسته‌ای، جهت اتصال ورق‌های فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بطوری که در ساخت بدنه یک خودرو بالغ بر حدود بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ جوش نقطه‌ای دارد. کنترل کیفیت جوش نقطه‌ای بر اساس استانداردهای بین‌المللی انجام می‌گیرد که غالباً با تخریب نمونه‌ها همراه است. استفاده از روش مخرب در کنترل کیفیت جوش‌های نقطه‌ای ایجاد شده روی قطعات مختلف و یا بدنه‌های کامل خودرو هزینه زیادی دارد. که در صورت کنترل کیفیت این نقاط با استفاده از روش غیرمخرب و فروش قطعات جوش داده شده، صرفه‌جویی خواهد شد. بر این اساس باید روشی غیرمخرب جهت ارزیابی و کنترل جوش‌های نقطه‌ای به کار گرفت. یکی از این روش‌ها، آزمون غیرمخرب فراصوتی (ultrasonic) است که در این پروژه با موفقیت برای بررسی مورد استفاده قرار گرفته است. امواج فراصوتی قطر دکه جوش را که شاخص مهم در کیفیت جوش است را مورد ارزیابی قرار می‌دهند. در این پژوهش تعداد زیادی جوش‌های نقطه‌ای سالم و معیوب ساخته شده است و این نمونه‌ها توسط روش غیرمخرب فراصوتی و روش مخرب تست کشش-برش آزمایش شدند. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان داد که آزمون فراصوتی قادر است به خوبی جوش‌های معیوب را تشخیص دهد و نتایج آن در خط تولید نیز باعث بهبود در روش آزمون گردیده است.

واژگان کلیدی: جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، دکه جوش، امواج فراصوتی، صنایع خودروسازی.

۱- مقدمه

بر اساس استانداردهای صنعتی جوشکاری مورد استفاده در شرکت ایران خودرو، استانداردهای B131220 و B131226 از PSA PEUGEOT CITROEN می‌باشند، یکی از مهمترین معیارهای کنترل کیفیت جوش‌های نقطه‌ای، اندازه دکه جوش در راستای فصل مشترک دو ورق است.

فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای برای اتصال ورق‌های نازک از ۰/۰۲ میلی‌متر تا ورق‌های ضخیم ۲۵ میلی‌متر بکار می‌رود. اگر چه عمده کاربرد جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای برای ضخامت‌های زیر ۶ میلی‌متر می‌باشد [۲]. حرارت لازم برای این فرایند بوسیله مقاومت الکتریکی قطعه کار در مقابل عبور شدت جریان تامین می‌شود. بدلیل مسیر کوتاه عبور شدت جریان در قطعه کار و مدت زمان

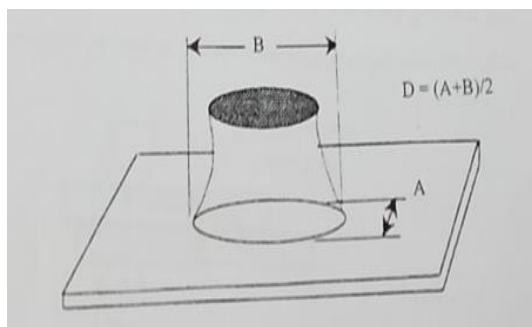
فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در صنایع خودروسازی به صورت عمده در بخش‌های مختلف صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است و کاربردهای فراوانی دارد. جوش مقاومتی در سال ۱۸۷۷ توسط الیو تامسون اختراع شد و به سرعت رشد کرد. اولین اتومبیل فولادی جوش داده شده در سال ۱۹۳۳ تولید شد [۱]. علت این کاربرد وسیع، مزیت این فرایند در بالا بودن راندمان جوشکاری و قابلیت رباتیک شدن آن می‌باشد [۲]. یک وسیله نقلیه امروزی بطور معمول بین ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ جوش نقطه‌ای دارد [۳]. برای مثال بدنه خودرو سواری تندر ۹۰ دارای ۳۷۲۱ جوش نقطه‌ای می‌باشد. در شکل ۱-۱ جوش‌های نقطه‌ای در بدنه خودرو مشاهده می‌شود.

ثانیه) و Q مقدار حرارت تولید شده (بر حسب ژول) است. این رابطه به قانون ژول معروف است. می توان دید که مقدار حرارت بطور مستقیم با مربع شدت جریان و بطور خطی با مدت زمان اعمال شدت جریان و مقاومت الکتریکی هادی متناسب است. مقداری از این حرارت تولید شده برای ایجاد دکمه جوش مصرف می شود و بخشی از آن نیز به طرق مختلف تلف می شود [۴].

مهم ترین معیارهای کنترل جوش نقطه ای عبارتند از:
 ۱- قطر دکمه جوش: یکی از معیارهایی که تأثیر زیادی بر استحکام جوش نقطه ای دارد قطر دکمه جوش می باشد.
 ۲- ضخامت دکمه جوش: مقداری از ضخامت ورق ها که در اثر حرارت و جریان ذوب شده و تغییر ساختار داده باشد را ضخامت دکمه جوش در نظر می گیرند. در یک جوش خوب ضخامت دکمه جوش ۶۰٪ ضخامت ورق می باشد [۵].
 ۱-۱- اندازه قطر دکمه جوش

ابعاد نقطه جوش بوسیله ضخامت ورق مورد جوش معین می شود. قطر دکمه جوش یکی از مهمترین پارامترهای تعیین کننده استحکام جوش مقاومتی نقطه ای است که با اندازه گیری و مقایسه آن با مقادیر استاندارد می توان به سلامت جوش پی برد.

اندازه بهینه یا اندازه مینیمم قطر دکمه جوش برای یک ورق فولادی با ضخامت معین توسط جامعه جوشکاری آمریکا (AWS)، جامعه مهندسیین خودرو (SAE) و اتحادیه استانداردهای ملی آمریکا (ANSI)، مشترکاً، بر حسب استفاده از $dn = 4\sqrt{t(unwin)}$ تعیین می شود که در آن t ضخامت ورق نازکتر بر حسب میلی متر است [۶].

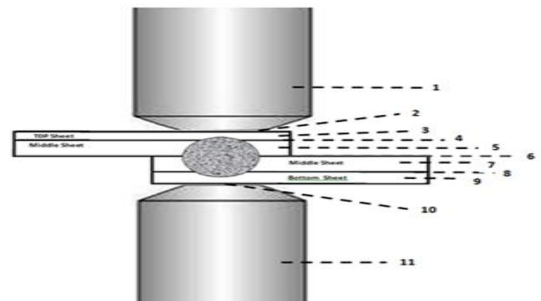


شکل ۴- روش اندازه گیری قطر متوسط هسته جوش [۶]

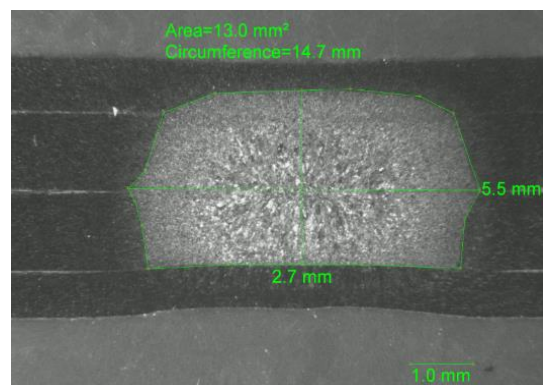
جوشکاری بسیار پایین، به جریان نسبتاً بالایی برای ایجاد جوشی با خواص مطلوب نیاز است [۴].



شکل ۱- جوش مقاومتی نقطه ای در بدنه خودرو تندرو ۹۰



شکل ۲- الف) نحوه قرار گرفتن قطعات بین الکترودها



شکل ۳- تصویر ماکروسکوپی از قطر به همراه HAZ و ضخامت دکمه جوش در اتصال چهار ورقه ای نمونه شماره ۲

در یک هادی الکتریسیته مقدار حرارت تولید شده به سه عامل بستگی دارد. الف) شدت جریان، ب) مقاومت الکتریکی هادی و پ) مدت زمان اعمال جریان می باشد. این سه عامل طبق رابطه ۱-۲ بر میزان حرارت تولید شده اثر می گذارد:

$$Q = RI^2t \quad (1-1)$$

که در آن I شدت جریان (بر حسب آمپر)، R مقاومت الکتریکی (بر حسب اهم)، t مدت زمان جوشکاری (بر حسب

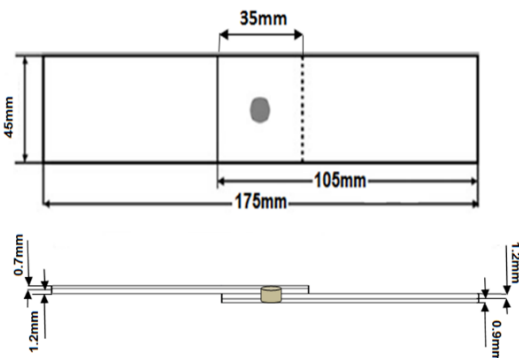
۹۵ درصد نتایج آزمون فراصوتی با نتایج مخرب مطابقت داشته است [۷].

در مقاله حاضر به بررسی تست غیرمخرب امواج فراصوتی در اتصالات چهارورقه ای جوش مقاومتی نقطه ای و تدوین دستورالعمل کاربردی آن در صنایع خودروسازی پرداخته و نتایج آن نیز با تست کشش- برش مقایسه و مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از ورق های فولادی کم کربن DC04 (که معادل فولاد کم کربن ST14 می باشد) مورد استفاده در صنعت خودروسازی با ضخامت های ۰/۷، ۱/۲، ۱/۲، ۰/۹ میلی متر به عنوان فلز پایه استفاده شده است. و نمونه ها طبق استاندارد EN ISO 14273 تهیه و به ابعاد ۱۰۵×۴۵ میلی متر با ضخامت های مورد نظر بریده شده و طرح اتصال مورد استفاده به صورت شماتیکی که در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

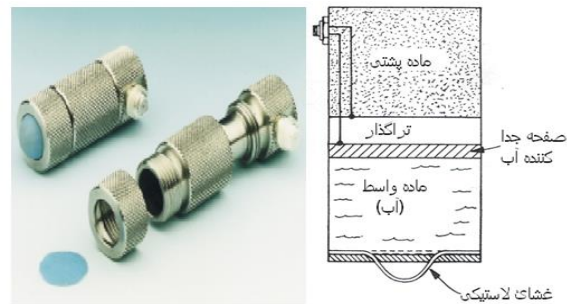
در شکل ۷ نحوه قرار گیری ورق ها روی شابلن مخصوص حین انجام فرایند جوشکاری جوش مقاومتی نقطه ای نشان داده شده است.



شکل ۶- طرح اتصال مورد استفاده در این پژوهش



شکل ۷- مونتاژ ورق ها روی شابلن مخصوص حین انجام فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه ای



شکل ۵- اجزای یک پروب بازرسی جوش نقطه ای

۲-۱- آزمون فراصوتی با استفاده از امواج طولی:

در این آزمون با استفاده از تراگذار (پروب) مخصوص، جوش نقطه ای بازرسی می گردد. این آزمون به روش بازتابی انجام می شود که در آن امواج فراصوتی طولی به داخل نقطه جوش فرستاده شده و با مطالعه سیگنال دریافتی از آن، کیفیت نقطه جوش تعیین می گردد. در تفسیر سیگنال های به دست آمده از دو متغیر زمان عبور و میزان استهلاك موج استفاده می شود. در صورت وجود ناپیوستگی در جوش و یا کم بودن قطر دکمه جوش، پژواک هایی مابین پژواک های دیواره پستی در سیگنال گرفته شده ظاهر می شود. میزان استهلاك نیز ضخامت دکمه جوش را مشخص می کند. هر چه ضخامت جوش کمتر باشد، استهلاك موج نیز کمتر و تعداد پژواک های دریافتی بیشتر خواهد شد [۴].

تی.ام.منصور^۱ در مقاله خود ضمن بیان استانداردهای جوش نقطه ای و روش های مختلف کنترل کیفیت آن، به بررسی آزمون فراصوتی جوش نقطه ای به روش بازتابی و سیگنال های بدست آمده از عیوب مختلف و چگونگی تفسیر این سیگنال ها می پردازد و روش فراصوتی را با روش های دیگر بازرسی جوش نقطه ای مقایسه کرده و در نهایت تشابه ۹۵ درصدی نتایج آزمون مخرب و فراصوتی را اعلام کرده و علت موفقیت این روش را در آموزش اپراتور و تجهیزات مناسب دانسته است [۷].

فرهنگ هنرور و عباس محمدی در مقاله ای به بررسی کنترل کیفیت جوش نقطه ای با استفاده از امواج فراصوتی پرداخته و با مقایسه نتایج تست غیرمخرب و مخرب با یکدیگر، جوش نقطه ای را به سه گروه قابل قبول، جوش چسبیده و قطر کم دکمه جوش تقسیم کرده اند که بالغ بر

¹T.M.Mansour

۲-۱- دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای
۴ میلی‌متر و فرکانس ۲۰ MHz ساخت شرکت کروت کرامر استفاده گردید.



شکل ۸- دستگاه آلتراسونیک مورد استفاده جهت ارزیابی جوش مقاومتی نقطه‌ای

۲-۳- آزمون های مخرب

هدف از این آزمون کنترل کیفیت جوش نقطه‌ای محصول است که شامل شناسایی یکسری از ایرادات و اقدام جهت رفع آنها در طی فرآیند ساخت و در کوتاه‌ترین زمان ممکن می‌باشد. در شرکت ایرانخودرو از دستگاه گان هیدرام و دستگاه تست کشش- برشدر این خصوص استفاده می‌گردد و در شکل های زیر نشان داده می‌شود.



شکل ۹- تخریب بدنه محصول رانا توسط اپراتور با دستگاه گان هیدرام جهت ارزیابی جوش مقاومتی نقطه‌ای

آزمون کشش- برش: نمونه های تست کشش- برش طبق استاندارد ANSI/AWS/SAE/D8.9-97 تهیه شدند. تست کشش- برش بوسیله‌ی یک دستگاه تست کشش INSTRON انجام شد. سرعت کشش برای انجام تست ها، ۲ میلی متر بر دقیقه انجام شد، زیرا این سرعت، سرعتی مشابه شرایط بارگذاری استاتیکی است.

- 1- Krautkramer
- 2- Central Processing Unit(CPU)
- 3- Random Access Memory(RAM)

جوشکاری توسط یک دستگاه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای رباتیک اعمال گردیده است. یک ربات از دو قسمت Manipulator و Controller تشکیل شده است و برای راه اندازی به تنهایی وجود این دو بخش ضروری می‌باشد.

لیست پارامترهای استفاده شده در این پژوهش برای ۲۴ نمونه های تست شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- لیست پارامترهای استفاده شده مورد آزمایش

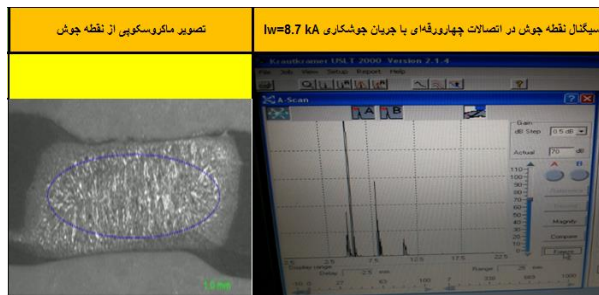
list of parameter					
	welding current(K A)	Welding time (cycles)	Electrode force (da.N)	squeeze time (cycles)	Hold times (cycles)
SAMPEL No. 1	4.7	14	300	45	10
SAMPEL No. 2	5.2	14	300	45	10
SAMPEL No. 3	5.7	14	300	45	10
SAMPEL No. 4	6.2	14	300	45	10
SAMPEL No. 5	6.7	14	300	45	10
SAMPEL No. 6	7.2	14	300	45	10
SAMPEL No. 7	7.7	14	300	45	10
SAMPEL No. 8	8.2	14	300	45	10
SAMPEL No. 9	8.7	14	300	45	10
SAMPEL No. 10	9.2	14	300	45	10
SAMPEL No. 11	9.7	14	300	45	10
SAMPEL No. 12	10.2	14	300	45	10

الکتروود مصرفی از نوع ARTRODE-11 بوده Alumina Dispersion Strengthened Copper (آلومیناپراکنده و مقاوم شده در مس). این ماده شامل مس حاوی ذرات بسیار ریزخالص اکسید آلومینیوم (۱۰ نانومتر اندازه) که به طور یکنواخت در زمینه مس پراکنده شده است.

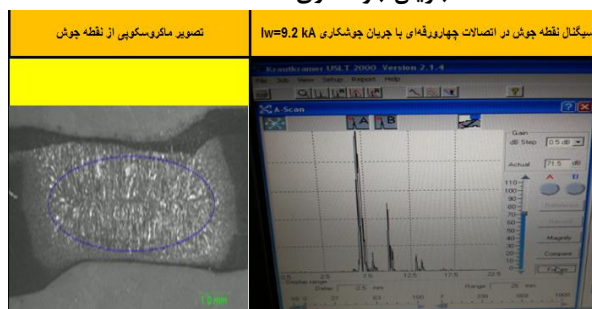
۲-۲- آزمون غیرمخرب امواج فراصوتی

تجهیزات آزمون فراصوتی مورد استفاده در آزمایش: در این آزمایش از دستگاه فراصوتی USLT 2000 شامل کارت آنالوگ به دیجیتال (A/D) ساخت شرکت کروت کرامر آلمان، به همراه کامپیوتر Notebook صنعتی ساخت شرکت پاناسونیک با پردازنده^۲ ۱۳۰۰ MHz و حافظه^۳ موقت ۲۴۸ مگابایت با نرم افزارهای آزمون فراصوتی شامل: ULTRALOG و USLT 2000 و همچنین تراگذار (پروپ) مخصوص آزمون فراصوتی نقطه جوش با قطر

می‌کند. با افزایش ضخامت دکمه جوش میزان استهلاک افزایش یافته و تعداد پژواک های دیواره پستی کاهش می‌یابد. شکل های ۱۲ و ۱۳ نیز سیگنال های دریافت شده از نقاط جوشی را نشان می‌دهند که با وجود عیوب، ارزیابی شدن این نقاط در آزمون فراصوتی، در هنگام تخریب استحکام داشته و استانداردهای آزمون مخرب را برآورده کرده‌اند. وجود این نقاط باعث ایجاد خطا در ارزیابی فراصوتی می‌شود.



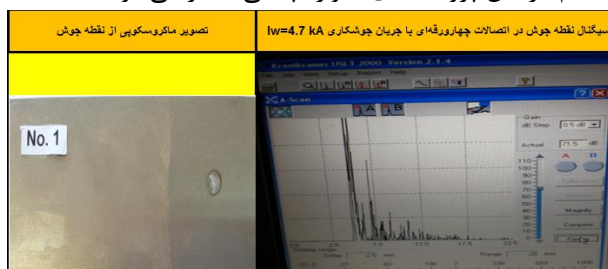
شکل ۱۲- سیگنال دریافت شده از جوش سالم چهار ورقه ای با جریان جوشکاری $I_w=8.7 \text{ kA}$



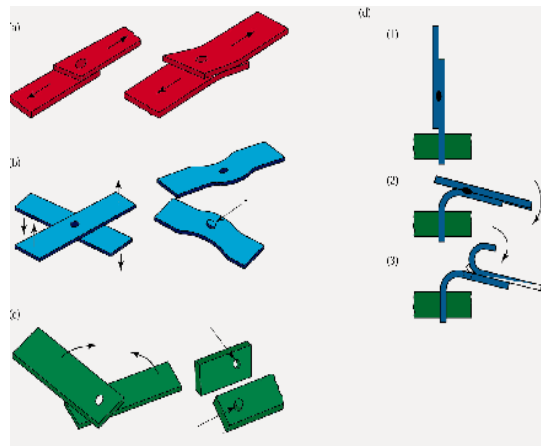
شکل ۱۳- سیگنال دریافت شده از جوش سالم چهار ورقه ای با جریان جوشکاری $I_w=9.2 \text{ kA}$

۲-۴- جوش سرد یا چسبیده

شکل های ۱۴ و ۱۵ سیگنال های دریافت شده از جوش های سرد چهار ورقه ای را نشان می‌دهند. تعداد پژواک های دیواره پستی در این سیگنال ها بیشتر از تعداد پژواک های گرفته شده از جوش سالم می‌باشند ضمن آنکه در اغلب موارد پژواک های سطح مشترک ورق های متصل به هم در بین پژواک های دیواره پستی ظاهر می‌شوند.



شکل ۱۴- سیگنال دریافت شده از جوش سرد چهار ورقه ای با جریان جوشکاری $I_w=4.7 \text{ kA}$



شکل ۱۰- روش های مختلف جداسازی ورق ها



شکل ۱۱- دستگاه تست کشش - برش مورد استفاده در آزمایش

۲-۴- حالت شکست جوش های نقطه‌ای

در طی انجام آزمون کشش- برش، دو رفتار شکست متمایز شد. شکست فصل مشترکی (IF) و شکست محیطی (PF). در شکست فصل مشترکی یا برشی (Interfacial) شکست با رشد ترک از میان دکمه جوش رخ می‌دهد. شکست محیطی با بیرون کشیدن دکمه (Pull out) با رشد ترک در حول دکمه (HAZ) رخ می‌دهد.

۴- مطالعه سیگنال های نقاط جوش در اتصالات چهارورقه ای جوش مقاومتری نقطه ای

۴-۱- جوش سالم

سیگنالهای دریافت شده از این نقاط در شکل های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده‌اند. این سیگنال ها دارای پژواک عیب نبوده و یا پژواک حاصل از عیب در آنها کوچک می‌باشد. بسته به ضخامت دکمه جوش، میزان استهلاک موج متفاوت بوده و تعداد پژواک های دیواره پستی فرق

کاهش هزینه‌های تولید، توجه خاصی به این روش غیرمخرب در بازرسی قطعات و کنترل کیفی آنها دارند.

۲- روش فراصوتی به عنوان یکی از روشهای غیرمخرب، سالها توسط شرکتهای تولیدی مختلف مورد استفاده قرار گرفته و توانایی بالایی از خود در کشف و شناسایی انواع عیوب جوش نقطه‌ای نشان داده است.

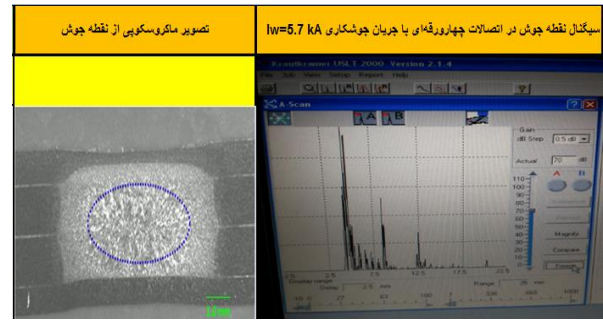
۳- هدف از انجام این پروژه بررسی امکان جایگزینی این روش به جای روش مخرب در بازرسی کیفی نقاط جوش در شرکت خودروسازی ایران خودرو و تعمیم آن به دیگر مجموعه‌های تولیدی در این شرکت و صنایع مختلف تولیدی کشور بوده است. در صورت استفاده از این روش به عنوان جایگزین و یا مکمل روش مخرب می‌توان با عدم تخریب مجموعه‌ها و قرار دادن این مجموعه‌ها در چرخه تولید از صرف هزینه‌های اضافی در کنترل کیفیت نقاط جوش جلوگیری کرد. میزان مطابقت دو روش برای مجموع نقاط سالم و معیوب قطعات حدود ۸۵٪ می‌باشد. این نتایج نشان‌دهنده مطابقت بالای روش فراصوتی با روش مخرب در تشخیص نقاط جوش سالم می‌باشد.

قدردانی و تشکر

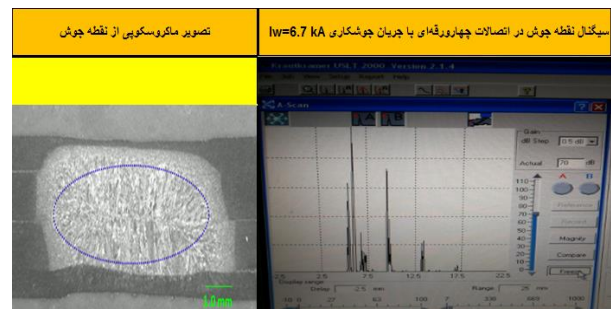
نویسندگان بدلیل پشتیبانی و حمایت گروه صنعتی ایران خودرو از این مقاله نهایت قدردانی و تشکر را دارند.

مراجع

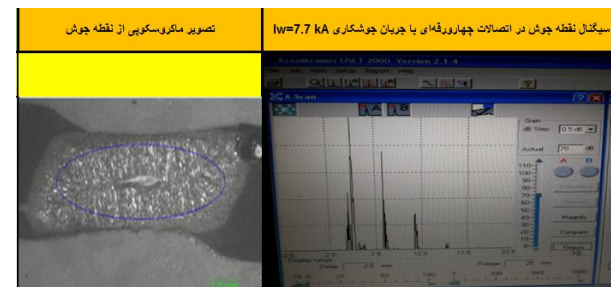
- [۱] پورانوری، مجید، "ارتباط کیفیت جوش و متغیرهای فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق فولادی St 12"، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پایان نامه کارشناسی، ۱۳۸۳.
- [۲] فرهنگ دوست، سجاد، "جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد ساده کربنی و کم آلیاژی استحکام بالا در گستره ضخامت های مختلف"، دانشگاه صنعتی شریف، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۸.
- [۳] پورانوری، مجید، مرعشی، پیروز، موسوی زاده، مصطفی، "ریزساختار و رفتار شکست اتصال ناهمجنس جوش های مقاومتی نقطه ای فولاد دوفازی فریتی - مارتنزیتی DP600 و فولاد ساده ی کم کربن St14"، اولین همایش ملی فولادهای پیشرفته، ۱۳۸۹، کرمان.
- [۴] ادیبی، بهنام، "اثر اختلاف مقاومت الکتریکی بین ورق های فولاد ساده کربنی/ فولاد زنگ نزن آستنیتی بر خواص مکانیکی و ریزساختار جوش مقاومتی نقطه ای"، دانشگاه صنعتی شریف، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۱.
- [۵] مغنی زاده، عباس، "بررسی پارامترهای موثر بر خصوصیات فیزیکی جوش نقطه‌ای درورقهای فولادی کم کربن"، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۰.



شکل ۱۵- سیگنال دریافت شده از جوش سردچهار ورقه ایبا جریان جوشکاری $I_w=5.7 \text{ kA}$



شکل ۱۶- سیگنال دریافت شده از جوش با قطر کم دکمه جوش چهار ورقه ای با جریان جوشکاری $I_w=6.7 \text{ kA}$



شکل ۱۷- سیگنال دریافت شده از جوش با قطر کم دکمه جوش چهار ورقه ای با جریان جوشکاری $I_w=7.7 \text{ kA}$

۴-۳ جوش با قطر کم (هسته ضعیف دکمه جوش) در سیگنال گرفته شده از این جوش، پژواک های میانی حاصل از برخورد موج با فصل مشترک ورق ها مابین پژواک های دیواره پستی ظاهر شدند. تعداد پژواک های دیواره پستی بستگی به ضخامت دکمه جوش دارد. که در آزمون مخرب، این جوش ها قطری کمتر از قطر استاندارد داشته‌اند.

نتیجه‌گیری

۱- روش غیرمخرب فراصوتی تأثیر بسزایی در کاهش هزینه‌های تولید دارند و صنایع خودروسازی در جهت

advanced high strength steel,"Materials and Design, vol. 32, pp. 1390–1398, 2011.

[8] W. Jung, Y. Kwon, 'Selecting the spot welding condition of multi-layer vehicle structure" SAE Technical paper, SAE, Detroit, Michigan, 1997.

[9]N. Harlin, T. B. Jones, and J. D. Parker, "Weld growth mechanisms of resistance spot welds in zinc coated steel" Journal of Materials Processing Technology , 2003, pp. 448-453.

[۶] محمدی،عباس، "بکارگیری آزمون فراصوتی در بازرسی جوش های نقطه ای"، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۸۰.

[7] M. Pouranvari, S. M. Mousavizadeh, S. P. H. Marashiet al., "Influence of fusion zone size and failure mode on mechanical performance of dissimilar resistance spot welds of AISI 1008 low carbon steel and DP600

Investigation of Ultrasonic Nondestructive Testing of Four-Sheet Stack Spot Welds and Implementing it in the Automotive Industry.

Hassan Eizadi¹, Aref Akbari², Reza Masajedi³

¹MSc in Material and Metallurgy Engineering, Amirkabir University of Technology; mehdiizadi250@gmail.com

²BSc in Welding Engineering Technology, Iranian Welding Research & Engineering Center; a.akbari@ikco.com

³Expert in Industrial Management, Payamenoor University; r.masajedi@ikco.com

Abstract

Resistance spot welding process is one of the most common and oldest methods of resistance welding. It is widely used in various industries, especially automotive, aerospace, electronics and nuclear industries. In a car body, there are approximately 2000 to 5000 spot welds. Spot welding quality control is carried out according to international standards, which is often accompanied by demolition of samples. The use of a destructive method in controlling the quality of spot welds on different parts or the entire body of the car costs a lot. Nondestructive quality control of spot welds will reduce these costs. One of these nondestructive methods is an ultrasonic testing that has been successfully used in this project. The ultrasonic waves measure the diameter of the nugget, which is an important indicator of weld quality. In this study, a large number of intact and defective spot welds were prepared and tested by ultrasonic nondestructive methods and pull-shear destructive testing. The results of these experiments showed that the ultrasonic tests can successfully detect defective welds.

Keywords: Spot resistance welding, Nugget, Ultrasonic test, Automotive

بازرسی غیر مخرب مولدهای بخار (PGV-1000 M) نیروگاه‌های هسته‌ای روسی مدل VVER-1000

سید فاضل قاضی اردکانی^۱، رضا کاظمی اقدام^۲

^۱ نیروگاه اتمی بوشهر fazelghazi@yahoo.com
^۲ نیروگاه اتمی بوشهر aghdamreza50@gmail.com

چکیده

تستهای غیر مخرب به عنوان یکی از مولفه های عمده تامین ایمنی در نیروگاه‌های هسته‌ای جایگاه ویژه ای دارند. با عنایت به اهمیت ایمنی و یکپارچگی مدارهای نیروگاه‌های هسته‌ای، بخصوص تجهیزات و خطوط لوله مدار اول، اعمال یک سلسله تستهای غیر مخرب می تواند اطمینان از عملکرد این تجهیزات را بالا برد. نباید فراموش کرد که با بازرسی های به موقع می توان از وقوع حوادث بسیار ناگوار ملی، منطقه ای و جهانی جلوگیری به عمل آورد. به عنوان مثال LOCA یا از دست دادن آب مدار اول که در واقع شکست عرضی لوله های مدار اول می باشد و یکی از عمده ترین خطرات در نیروگاه‌ها هسته‌ای به شمار می آید قابل پیشگیری است. تجهیزات مدار اول مانند راکتور، مولد بخار، فشارنده، پمپها و لوله های اصلی مدار اول، بر اساس برنامه عمومی بازرسی حین بهره برداری بصورت دوره ای و منظم تحت تستهای غیر مخرب قراردارند. از تجهیزات فوق مولد بخار دارای جایگاه ویژه ای است. این تجهیز به عنوان مرز مدار اول و دوم نقش حساس و پیچیده ای در کارکرد نیروگاه دارد. وجود تقریباً ۱۱۰۰۰ تیوب U شکل جهت تبادل حرارتی بین مدار اول و دوم مؤید اهمیت کنترل این سطوح است. وجود منفذ در این تعداد لوله و سطح تبادل حرارتی می تواند مشکلات زیست محیطی و اقتصادی زیادی به همراه داشته باشد. از این رو کنترلها و بازرسی های دقیق و کارآمد غیر مخرب بر روی این تجهیز می تواند مشکلات زیادی را مرتفع نماید.

واژگان کلیدی: مولد بخار، VVER-1000، PGV-1000 M، نیروگاه هسته‌ای بوشهر

مقدمه

در مقدمه بطور اختصار، اصول کار مولدهای بخار^۱ نیروگاه هسته‌ای را بررسی می‌کنیم.

مولد بخار جهت انتقال حرارت خنک‌کننده مدار اول^۲ به آب تغذیه مدار دوم^۳ و گرم کردن آن تا رسیدن به درجه حرارت نقطه جوش، تبدیل آب تغذیه مدار دوم به بخار اشباع، جذب رطوبت بخار و تولید بخار اشباع خشک، طراحی و ساخته می‌شود.

مولد بخار دارای دو کلکتور آب سرد و گرم است. آب گرم مدار اول (خنک‌کننده که تا دمای ۳۲۰ درجه سانتیگراد در راکتور گرم شده است) توسط لوله های اصلی با قطر ۸۵۰ میلی متر (به اصطلاح خط گرم) به کلکتور گرم مولد بخار ارسال می‌شود. در کلکتور است که آب گرم که حرارت را از قلب راکتور با خود به همراه دارد، وارد تعداد ۱۱۰۰۰ لوله U شکل می‌شود و با گذر از این مسیر (حد فاصل کلکتور

گرم تا کلکتور سرد) حرارت خود را به آبمدار دوم در مولد بخار می‌دهد. خنک‌کننده مدار اول تا ۲۹۰ درجه سانتیگراد سرد می‌شود و در ادامه از طریق کلکتور سرد وارد خط سرد و سپس راهی پمپ اصلی مدار اول می‌شود (مدار بسته). در سوی دیگر آب مدار دوم می‌باشد که برای برداشت حرارت از آب مدار اول و تبدیل شدن به بخار از سمت مدار دوم وارد مولد می‌شود. آب تغذیه از طریق لوله ورود اصلی، وارد مولد بخار می‌شود و توسط توزیع کننده، پخش می‌شود. چرخش آب تغذیه درون مولد بخار به صورت طبیعی صورت می‌گیرد. در اثر تبادل حرارت، آب تغذیه به جوش آمده، بخار می‌شود. بخار تولید شده به سمت کلکتورهای بخار خروجی می‌رود. این بخار با چرخاندن توربین و روتور ژنراتور تولید برق را ممکن می‌سازد (شکل ۱ و ۲) [1].

بدنه محفظه مولد بخار از ۶ قسمت تشکیل می‌شود که توسط جوش به یکدیگر متصل می‌شوند. این قسمتها شامل

¹ Steam generator

² Coolant

³ Cooler

۱- کنترل ورودی^۲: این تستها از ورود تجهیز به نیروگاه تا پایان مونتاژ انجام می شود.

۲- بازرسی اولیه^۳: این تستها پس از تستهای هیدرولیک مدار اول در فشار ۲۴/۵ مگا پاسکال و تست هیدرولیک مدار دوم در فشار ۱۰/۸ مگا پاسکال انجام می پذیرد تا عیوب بوجود آمده مشخص شود.

۳- بازرسی ثانویه: این تستها پس از تستهای گرم مدار^۴ اول و دوم انجام می پذیرد.

پس از انجام بازرسی های فوق و اطمینان از صحت وضعیت تجهیزات و خطوط لوله، ورود به بهره برداری آغاز می شود. براساس برنامه فوق مولد های بخار نیروگاه اتمی از زمان ساخت، انتقال و پذیرش در نیروگاه بوشهر، نگهداری، نصب و مونتاژ و پس از کلیه تستهای استحکامی مورد نیاز، تحت بازرسی های غیر مخرب متنوع و متعدد قرار می گیرد. مباحث مطروحه نتایج میدانی حاصله از کنترلهای این تجهیز توسط تجهیزات بازرسی اتوماتیک روسی و اروپایی در بازرسی قبل از بهره برداری می باشد که مقایسه و تحلیل اجمالی بر آنها صورت گرفته است.

نتایج و بحث

تستهای غیر مخرب انجام گرفته بر مولد بخار از منظر نحوه انجام تستهای غیر مخرب، شامل دو دسته هستند. دسته اول تستهایی که بصورت دستی و غیر اتومات انجام می شود و دسته دوم شامل انجام تستهای غیر مخرب با استفاده از تجهیزات اتومات و کنترل از راه دور است.

دسته اول عمدتاً شامل کنترلهایی است که از سمت مدار دوم و بدنه بیرونی مولد بخار انجام می پذیرد. بدلیل عدم آلودگی مدار دوم در شرایط نرمال و انجام کنترلهای دقیق دزیمتری در این مناطق در حین بازرسی ها، انجام بازرسیهای غیر مخرب می تواند به صورت دستی با رعایت دقیق موارد ایمنی تشعشعی انجام گیرد.

این کنترلها شامل بازرسی چشمی، التراسونیک، مایع نافذ، ذرات مغناطیسی، تستهای نشتی می باشند که بر اساس برنامه بازرسی قبل از بهره برداری و برنامه های کاری^۵ تهیه شده توسط لابراتوار مواد نیروگاه به فراخور حال قرار گرفته

کفهای بیضوی شکل دو طرف، کنارهها و مرکز بدنه می باشد. مشخصات فنی مولد بخار در جدول شماره (۱) ذکر شده است [2].

جدول (۱) مشخصات فنی مولد بخار [2].

ردیف	مشخصات فنی	مقادیر و ابعاد
۱	قدرت حرارتی	750+50 Mwt
۲	مقدار بخار تولیدی	ton/h 1470+103
۳	فشار بخار تولید شده	6.3 MP
۴	حرارت بخار تولید شده	278.5 °C
۵	حرارت آب تغذیه مدار دوم	164-220 °C
۷	حرارت آب ورودی مدار اول به مولد بخار	320 °C
۸	حرارت آب خروجی مدار اول از مولد بخار	290 °C
۹	فشار آب مدار اول در ورود به مولد بخار	15.7 MP
۱۰	دبی آب در گردش هر مولد بخار (مدار اول)	21200 m ³ /h
۱۴	فشار تست مولد بخار (قسمت مدار اول)	24.50 MP
۱۵	فشار تست مولد بخار (قسمت مدار دوم)	10.8 MP
۱۷	تعداد لوله های U شکل	11000
۱۸	ضخامت لوله های U شکل	1.5 mm
۱۹	قطر لوله های U شکل	16 mm

روش تحقیق

برنامه عمومی بازرسی قبل از بهره برداری^۱ کلیه تستهایی که جهت کنترل وضعیت فلز پایه، اتصالات جوشکاری، تجهیزات و لوله ها و تمامی سیستمهایی که روی ایمنی نیروگاه اتمی تاثیر گذار هستند را شامل می شود. بر اساس این برنامه کلیه قسمت های مولد بخار و حجم کنترلها و پریرود تکرار این تستها معرفی می گردد. بر اساس این برنامه عمومی، تستها شامل سه مرحله [3]:

¹ Typical Program of Pre-Service Inspection

² Incoming Control

³ Inspection 1

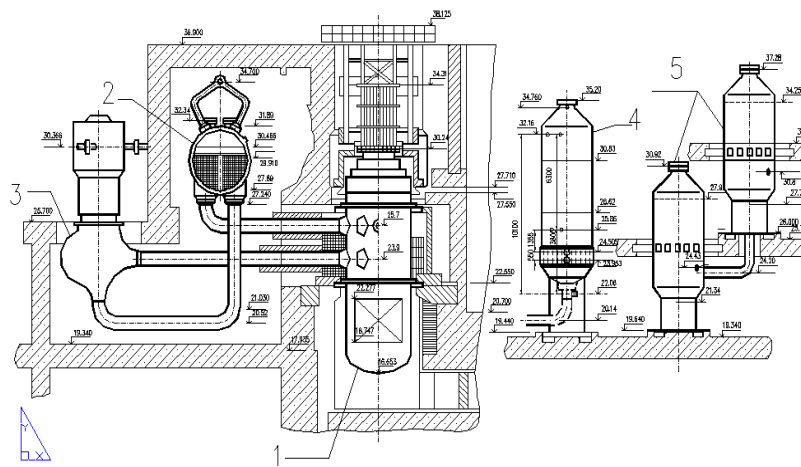
⁴ Hut Run

⁵ Working Program

پیچ‌های محکم کننده سرهای کلکتور مدار اول و دوم با توجه به اینکه تحت فشار زیادی قرار می‌گیرند نیز توسط متدهای چشمی، التراسونیک، مایع نافذ تست می‌شوند و در صورت تشخیص عیوب خطی بخصوص در رزوه‌های انتهایی هر دو سر مردود اعلام شده و تعویض می‌گردند. تمام مناطق آب بندی در هر باز و بسته شدن تحت تست چشمی و در صورت نیاز تستهای مکمل دیگری بخصوص مایع نافذ قرار می‌گیرد [1,3].

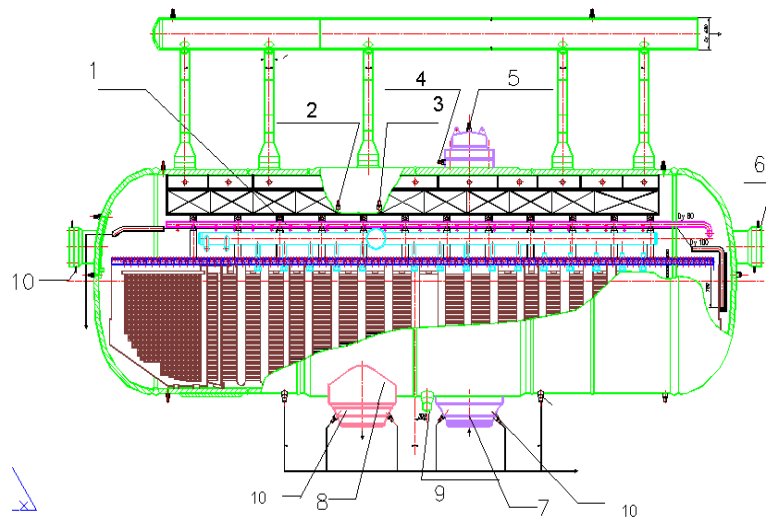
است. نتایج بدست آمده حاکی از شرایط مناسب این تجهیز دارد.

بازرسی چشمی و مایع نافذ تقریباً کلیه مناطق و خطوط جوش مولد بخار را با حجم ۱۰۰٪ پوشش می‌دهد. علاوه بر آن ناحیه‌ای در حدود ۱۰۰۰*۵۰۰ میلی مترمربع از بدنه مولد بخار و از سمت درون آن در منطقه مرز آب و بخار توسط تست چشمی کنترل می‌گردد و بر اساس این بازرسی و در صورت نیاز تستهای مکمل مانند ذرات مغناطیسی و مایع نافذ نیز در این مساحت انجام می‌شود. این ناحیه مستعد بروز عیوب، بخصوص خوردگی حفره ای می‌باشد [1,3].



شکل ۱- تجهیزات اصلی مدار اول

۱-راکتور ۲-مبدل بخار ۳-پمپ اصلی ۴-فشارنده ۵-مخازن سیستم ایمنی غیر فعال [1,2]



شکل ۲- محفظه مولد بخار

۱-هدر آب تغذیه اضطراری ۲-کنترل عدم نشستی فلانچ از مدار اول ۳-هواکش مدار اول ۴-کنترل عدم نشستی فلانچ از مدار دوم ۵-هواکش مدار دوم ۶-دریچه ۷-ورود آب گرم ۸-خروج آب سرد ۹-درین ۱۰-خط جوش [111]

تیوپهای U شکل تبادل حرارتی و محل اتصال این تیوپها به کلکتورها می باشند [5].

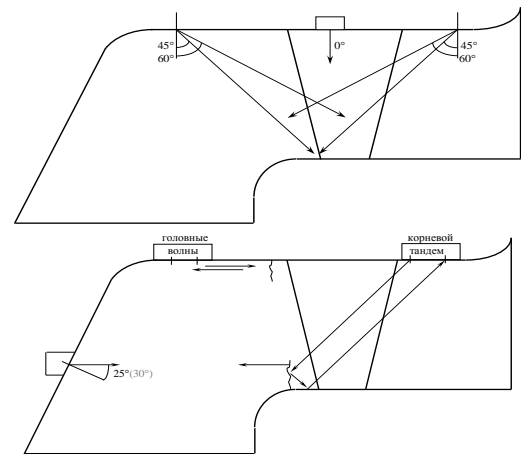
در نیروگاه هسته‌ای بوشهر دستگاه مذکور ساخت کشور روسیه و توسط انستیتو NIKIMT طراحی و ساخته شده است. این انستیتو ساخت و طراحی دستگاههای اتوماتیک نیروگاه تیان وان چین را نیز بر عهده داشته است. این دستگاه اصطلاحاً 38CK016M نامیده می شود که شامل ۵ بازوی قابل نصب بر روی پایه اصلی است که هر کدام وظیفه بخصوصی را ایفا می کند [5].

۱- بازوی تست التراسونیک: این بازو شامل ۱۱ پروب می باشد. امواج ارسالی التراسونیک در دو صفحه (یکی عمود و دیگری موازی با محور خط جوش) و در هر صفحه در دو جهت ارسال می گردد. در صفحه عمود بر محور خط جوش پروبهای زاویه ای با موج عرضی ۴۵ و ۵۰ درجه و موج طولی ۷۰ درجه با فرکانس ۱/۸ مگا هرتز استفاده می شود. در صفحه موازی با محور خط جوش پروبهای زاویه ای با موج عرضی با زاویه ۵۰ درجه و با موج طولی ۷۰ درجه با فرکانس ۱/۸ مگا هرتز استفاده می شود. همچنین یک پروب دو قلو^۳ با فرکانس ۲/۵ مگا هرتز نیز به کار میرود (شکل ۴). وظیفه این بازو انجام تست التراسونیک بر روی خط جوش کلکتور مولد بخار و بررسی عدم تورق روکش ضد زنگ آن می باشد. با این تجهیز عیوبی با مساحت موثر ۵ میلی مترمربع و بزرگتر قابل تشخیص می باشد. این کلکتور توسط فولاد ضد زنگ اوستنیتی پوشش ضد خوردگی داده شده است و مرز این روکش با فلز اصلی جهت تشخیص تورق^۴ کنترل می گردد. قابل ذکر است که عیوب درون پوشش ضد خوردگی مد نظر نبوده و کنترل نمی گردد در مرز فلز اصلی و پوشش ضد خوردگی عیوب با مساحت موثر ۱۰ میلی مترمربع و بیشتر قابل تشخیص است [5].

۲- بازوی تست ادی کارنت: وظیفه این بازو تست تیوپها و سر تیوپهای مولد بخار است. استفاده از پروبهای مناسب، تاثیر چشمگیری بر نتایج و دقت تستها دارد. کارایی این بازو شدیداً وابسته به نوع پروبهای استفاده شونده و توانایی نرم افزاری دستگاه دارد. این تست در نیروگاه اتمی بوشهر به حجم تقریبی ۲۰٪ کل تیوپها توسط دو شرکت روسی و کراوات با تجهیزات متفاوت انجام گرفت. نتایج بدست آمده

خط جوش موسوم به خط جوش ۱۱۱ یکی از حساسترین خطوط جوش مولد بخار محسوب می شود. این خط جوش محل اتصال بدنه مولد بخار با کلکتورهای مدار اول در قسمت پایینی کلکتورهای سرد و گرم است. بالغ بر ۱۰ نیروگاه تاکنون وجود ترکهای عرضی و طولی در اطراف این خط جوش را تجربه کرده و با چالش روبرو شده اند. قسمت معیوب معمولاً از مولد بخار جدا شده و با جوشکاری محل مورد نظر را ترمیم می نمایند. با استفاده از متد التراسونیک معمولی و روش خاص، این ناحیه حساس تست می شود. این ناحیه در نیروگاه بوشهر کاملاً بی عیب بوده است (شکل ۲، ۷) [4].

برای تست التراسونیک این خط جوش از پروبهای مستقیم، زاویه ای ۲۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه و پروبهای تاندوم^۱ و موج سطحی^۲ با زاویه ۱-۱۵ درجه استفاده می شود (شکل ۳ و ۷) [4].



شکل ۳- نمایی از نحوه تست التراسونیک خط جوش ۱۱۱ [4].

دسته دوم شامل تستهایی است که توسط دستگاههای اتوماتیک انجام می پذیرد که شامل کنترلهایی که از سمت مدار اول که در تماس با مواد و سیال آب آلوده و بعضاً حاوی ذرات اکتیو مدار اول است انجام می پذیرد که عبارتند از:

۱- بازرسی چشمی- ویدئویی، ۲- بازرسی التراسونیک خط جوش کلکتور، ۳- بازرسی ادی کارنت تیوپها و دیواره لوله ها. این مناطق شامل بدنه داخلی کلکتور سرد و گرم،

¹Tandom techniques

² Lamb wave Probe

³Dual Element Probe

⁴ Lamination

یکی از موارد مهم تشخیصی در مولدهای بخار، ضخامت باقی مانده تیوپها می باشد. نرم بندی این کاهش ضخامتها به این شکل است که تا قبل از بهره برداری کاهش ضخامت تا عمق بیشتر از $0/05$ میلیمتر عیب محسوب می گردد. تا سال پانزدهم از کارکرد این مولدها کاهش ضخامت تا عمق بیشتر از $0/6$ میلیمتر و بعد از سال پانزدهم تا سال سی ام کاهش ضخامت تا عمق بیشتر از $0/65$ میلیمتر عیب محسوب می شود [8].

در مواقعی که رسوب بر بدنه تیوپها نشسته است یا ذرات فلزی بر بدنه لوله، سیگنالهای اشتباه را ارسال می کند از پروبهای مخصوص چرخان همراه با لرزش استفاده می گردد. در این شرایط لرزش ایجاد شده ذرات را از بدنه داخلی لوله جدا کرده و پس از شلیک دوباره پروب، که منجر به تمیزی لوله می گردد سیگنال مربوطه ثبت و آنالیز می گردد. علاوه بر این وجود آب درون تیوپها، سیگنالهای اشتباه را همراه با تداخل نامفهوم آنها موجب می شود لذا می بایست کاملا تیوپها خشک باشند. در نیروگاه بوشهر با بستن لاستیک به سر پروبهای بوبینی و ارسال آنها به درون تیوپها، لوله ها خشک گردید. تفاوت اختلاف پتانسیل بین پروب و تیوپها عامل سیگنالهای اضافی است.

با توجه به نگهداری مناسب مولد های بخار در نیروگاه بوشهر این مولدها در وضعیت کاملا مناسبی قرار داشتند. نتایج کنترلهای ادی کارنت این مطلب را به اثبات رسانید. در نیروگاه تیان وان چین نگهداری اشتباه مولدهای بخار موجب مشکلات زیادی گردید.

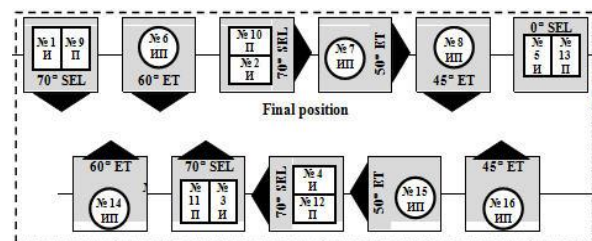
۳- بازوی تست چشمی: جهت بازدید چشمی بدنه کلکتور و سرلوله های تیوپهای مولد بخار مورد استفاده قرار می گیرد. نوع دوربین و بخصوص توانایی این تجهیز جهت مشخص کردن دقیق اندازه های عیب و بخصوص عمق، حایز اهمیت است.

۴- بازوی براده برداری و آماده سازی جهت جوشکاری لوله های U شکل: در مواقعی که تیوپهای مولد بخار می بایست بسته شود قبل از عملیات جوشکاری می بایست آماده سازی سر لوله ها جهت انجام جوشکاری انجام پذیرد. لازم به ذکر است که در حال حاضر جوشکاری سر تیوپها تقریبا جای خود را به بستن مکانیکی^۱ داده است. لذا در دستگاههای ساخت غرب در حال حاضر این بازو کاربردی ندارد.

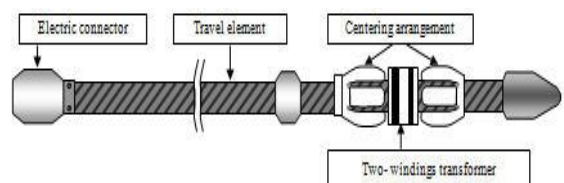
¹Mechanical plugging technique

از هر دو تجهیز تا درصد بسیار بالایی همخوانی دارد. پروبهای بوبینی، چرخان و صلیبی در این تجهیزات استفاده می گردند [6]. دستگاه 38CK016M تنها قادر به استفاده از پروبهای بوبینی جهت تست تیوپها است.

در این نوع پروبها (بوبینی)، دو سیم پیچ بر روی بدنه پروب بسته شده است (شکل ۵). این دو سیم پیچ از نظر عبور جریان الکتریکی خلاف جهت هم هستند. به همین دلیل به صورت تفاضلی عمل می کنند. حجم و عمق عیب با استفاده از این نوع پروبها و با استفاده از قطعات کالیبراسیون قابل تشخیص است. اگر عیوبی به طور محیطی دور تیوب قرار داشته باشند، با استفاده از این نوع پروب، امکان تشخیص آنها وجود ندارد [7]. علاوه بر آن، امکان تعیین محل عیب بر روی تیوب به طور شعاعی وجود ندارد. به علت سرعت بالا و قابلیت اطمینان این روش، معمولا کل طول تیوبها ابتدا با این نوع پروب تست می شود. در مواردی با توجه به عدم امکان تشخیص عیوب توسط پروبهای بوبینی، از پروبهای چرخان و صلیبی استفاده گردیده است. در این نوع پروبها، از یک یا چند سیم پیچ استفاده می شود. سیم پیچ، تنها در یک قسمت پروب قرار گرفته و در نتیجه برای تست کامل قطری تیوب، باید پروب داخل تیوب بچرخد (شکل ۵). از پروبهای چرخان جهت تشخیص دقیق عیب همچنین محل و جهت عیب به صورت محیطی بر روی تیوب و محلهایی مانند خمها و محل تکیه گاهها استفاده می شود [7].



شکل ۴- آرایش پروبهای التراسونیک بازوی دستگاه 38CK016M



شکل ۵- بوبین پروب دستگاه 38CK016M [5]

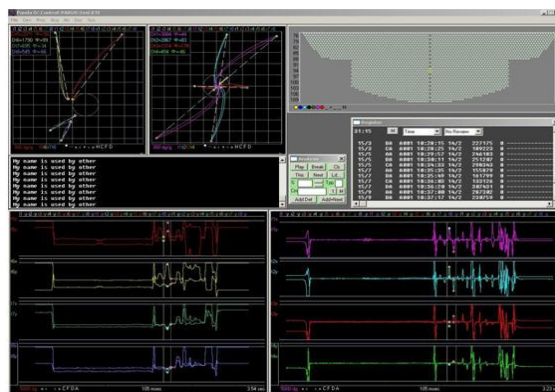
۲- با توجه به اهمیت پیشگیری از خروج آلودگی مواد رادیواکتیو از مدار اول و همچنین کوتاه بودن زمان تعمیرات نیروگاه استفاده از تجهیزات دقیق در زمینه تست ادی کارنت بسیار سرنوشت ساز است. توانایی تجهیزات بکار گرفته شده جهت مشخص کردن عیوب با کمک پروبهای بوبین، چرخان و صلیبی، بسیار حایز اهمیت است. این ساختار به روز و دقیق توسط دستگاههای ساخت کشور کرواسی و چند کشور غربی دیگر بکار گرفته شده است. در نیروگاه بوشهر تشخیص دقیق عیب توسط پروبهای مخصوص این تجهیزات مرتفع گردید. همچنین امکان شلیک همزمان دو پروب (دو پوشر)^۱ در این تجهیزات و سادگی کار با آنها سرعت عملکرد را بالا برده و منافع اقتصادی را رقم می زند. دستگاه 38CK016M دارای یک پوشر می باشد.

۳- در صورت کم شدن ضخامت تیوپها و یا نشستی از آنها دوسر تیوپها می بایست بسته شود. این عمل توسط دستگاه 38CK016M با متد جوش اتوماتیک ذوبی بدون الکتروود انجام می پذیرد. دستگاهها و متدهای اروپایی از روش پلاگ مکانیکی و اتومات و بدون عمل جوشکاری استفاده می نمایند که این روش با اطمینان بیشتر همراه است و تاثیرات نامطلوب جوشکاری را بر بدنه کلکتور به همراه ندارد.

۴- خط جوش شماره ۱۱۱ به دلیل جمع شدن مواد حاصل از خوردگی (عدم سیرکوله مناسب درون مولد بخار در این ناحیه) و تسریع انتشار ترک، می بایست با فواصل کوتاه تری تحت تست قرار گیرد. ساخت و مونتاژ صحیح و بهره برداریمناسب می تواند تا حدود زیادی در طول عمر مولد بخار موثر باشد.

۵- آنچه که نباید مورد غفلت واقع شود حضور کارشناسان خبره در تمام مراحل تست است. آنالیز سیگنالهای التراسونیک و ویدئویی و بخصوص ادی کارنت نیازمند تجارب بالا است که این مهم باید توسط نیروگاه قبل از اجازه انجام تستها، توسط نمونه های امتحانی تایید گردد. توانایی دستگاه و شایستگی فنی کارشناسان اپراتور و آنالیزاتور معمولاً توسط نمونه های استاندارد امتحانی تایید می شود.

۵- بازوی جوشکاری و پلاگ کردن لوله های معیوب: در دستگاه 38CK016M پس از قرار دادن بوش فلزی درون تیوبی که بایستی بسته شود و پس از آماده سازی محل سر لوله های تیوبهای معیوب با قرار دادن یک بوش فلزی و جوشکاری آن از دو سمت کلکتور سرد و گرم، تیوب مذکور کاملاً بسته می گردد. در دستگاههای غربی بستن لوله به روش مکانیکی انجام می گیرد که این فرایند ساده تر و با ریسک کمتری خواهد بود. علاوه بر آن جوشکاری، تنشهای حرارتی را به دیواره لوله ها و اطراف محل جوشکاری وارد می کند که مناسب ارزیابی نمی گردد. در نیروگاه بوشهر هیچ تیوبی نیاز به پلاگ کردن نداشته است.



شکل ۶- نمایی از مایناتور دستگاه [5] 38CK016M.



شکل ۷- نمایی از خط جوش ۱۱۱ و ترک بوجود آمده درون آن در نیروگاه زاپاروسکی اکر این سال ۲۰۱۰.

نتیجه گیری

۱- انجام بازرسی های چشمی توسط دوربینهای دستگاه اتوماتیک زمانی کارآمدی کامل را خواهد داشت که بتواند عمق عیب سطحی یا خراش دیده شده سطحی را برآورد نماید.

¹Dual pusher system

УЗЛА ПРИВ АРКИКОЛЛЕКТОРАКПА-
РОГЕНЕРАТОРУ ВВЭР-1000", МЦУ-11-98п,
изменением № 1, 2007.

[5] Research and Development Institute of Construction Technology, NIKIMT, "inspection system for steam generator's" 38-СК 016М.00.00.00. Д1, Д4.

[6] IAEA, "Strategy for Assessment of WWER Steam Generator Tube Integrity", IAEA-TECDOC-1577, December 2007.

[7] OH. Columbus, "Nondestructive Testing Handbook, Vol. 10", Nondestructive Testing Overview, American society for Nondestructive Testing, ASNT, second edition, 1996.

[8] ВНИИ АЭС, "нормы дефектов теплообменных трубок парогенераторов реакторной установки типа ВВЭР-1000", РД-ЭО-0157-99, 1998.

مراجع

[1] ОКБ "Гидропресс", ОАЭИ, АЭС «Бушер», Блок №1, " парогенератор ПГВ-1000М(В) С ОПОР", Руководство по эксплуатации, Часть 1.446.05Рэ, 1999.

[2] قاضی اردکانی، سید فاضل، " بررسی دقیق سیستمهای ایمنی- اضطراری نیروگاه های هسته‌ای نسل VVER-1000(V-320) و مقایسه آن با نیروگاه هسته‌ای بوشهر (V-446) VVER-1000(V-446)", پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، ۱۳۸۷.

[3] ВНИИ АЭС "Typical pre-operational test program of base metal and welded joints of BNPP unit 1 safety-related equipment and pipelines". 53.BU.10.0.AB. PM. АТЕХ0077.

[4] ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», "МЕТОДИКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Nondestructive Inspection of Russian Steam Generators (PGV-1000M) Model VVER-1000a

Seyed Fazel Ghazi Ardekani¹, Reza kazemi Aghdam¹
¹Bushar NPP

Abstract

Nondestructive testing has a special status as one of the main safety components in nuclear power plants. Given the importance of safety and integrity of nuclear power plant circuits, especially the primary circuit equipment and pipelines, the application of a series of Nondestructive tests can be assured improved performance of these equipment. It should not be forgotten that timely inspections can prevent very disastrous national, regional and global events. For example, the LOCA, or the loss of coolant accident, which is the first failure of the primary circuit prevented. The first circuit equipment, such as the generator, steam generator, pressurizer, pumps and main circuit pipes, are based on a general inspection plan during operation periodically and regularly under Nondestructive testing. Based on the above-mentioned equipment, the steam generator has a special position. This equipment as the first and second circuit boundary plays a critical and complex role in the power plant's operation. There are approximately 11,000 U-shaped tubes for heat exchange between the first and second circuits, which confirms the importance of controlling these levels. The presence of pores in this number of tubes and the heat exchanger level can have many environmental and economic problems. Therefore, accurate and efficient Nondestructive checks and inspections on this equipment can solve many problems

Keywords: Steam generator, M PGV-1000 . VVER-1000, BNP



نفتا صنعت
ناظران



NAFTA INDUSTRY OVERSEERS

www.nafta-industry.com

آزمون‌های غیرمخرب عمومی و پیشرفته،

آموزش، مهندسی و بازرسی جوش

آدرس: تهران، خیابان ستارخان

خیابان شادمهر (شادمان)، پلاک ۲۳۳، واحد ۴۰۲

کد پستی: ۱۴۵۶۸۹۳۵۱۶

تلفن: ۶۶۵۰۷۲۹۸-۶۶۵۱۶۳۶۱ (۰۲۱)

فکس: ۶۶۵۱۰۸۰۵ (۰۲۱)

ایمیل: info@nafta-industry.com



CGM CIGIEMME s.r.l.

Società del Gruppo C.G.M. Cigiemme S.p.a.



Since 1958...

Your quality relying on our experience

PENETRANT TESTING

Like with MPI, CGM CIGIEMME is able to offer a complete range of solutions for PT; from the simple equipment to the automatic system, from consumable (fluorescent and dye - contrast penetrant - produced on our own or licensed) to accessories.



MAGNETIC PARTICLE INSPECTION

Development, design and manufacturing of the entire range: from small portable equipment to automatic in-line system, from detection products to inspection accessories and tests.

ACCESSORIES

CGM completes its range with accessories, tools and test kits to improve the testing efficiency.



CONSUMABLES

CGM produces the whole range of consumables for both MPI and Penetrant testing.



SERVICE

A team of specialized engineers assures a top quality service worldwide.



www.cgm-cigiemme.it



CGM CIGIEMME S.r.l.
Via Adda, 21 - 20090 Opera (MI)
Tel. +39 02.57600400 - Fax. +39 02.57603618
cgm@cgm-cigiemme.it
Tel. +989151511417 Iran representative

بازرسی فنی

بازرسی انواع جرثقیل و لیفتراک
 بازرسی آسانسور و بالابر
 بازرسی جوش و تستهای غیر مخرب
 بازرسی دکلهای حفاری نفت و گاز
 بازرسی تجهیزات صنایع پالایشگاهی و نیروگاهی
 کالیبراسیون مخازن ذخیره و سیستم های اندازه گیری
 بازرسی شیرآلات صنعتی و فرآیندی
 بازرسی مخازن تحت فشار، اتمسفریک، دیگهای بخار و آبگرم
 بازرسی رنگ و پوشش
 بازرسی سیستم ارتینگ و چاه ارت



بازرسی دریایی

Draft Survey
 Ullage Survey
 On Hire Survey
 Off Hire Survey
 Bunker Survey

بازرسی کانتینر و بسته بندی کالا
 بازرسی انبارهای ساحلی و مخازن کشتی
 بازرسی و تعیین میزان خسارت وارده به کالا، کشتی
 صدور گواهینامه یدک کش

بازرسی کالا

نمونه برداری و کنترل کیفیت کالا
 بازرسی کالاهای صادراتی و وارداتی در مبدا و مقصد
 بازرسی نفت، مواد نفتی و پتروشیمی
 بازرسی کالاهای نفت، گاز و پتروشیمی
 بازرسی محصولات کشاورزی
 بازرسی مواد معدنی و ساختمانی، کانی غیرفلزی و مواد خام
 نمونه برداری از محصولات تولیدی
 بازرسی شخص ثالث کالاها در مبدا و مقصد
 بازرسی پیش از حمل

