

نشریه علمی-تربیتی

فناوری

آزمون‌های غیرمخرب

NONDESTRUCTIVE TESTING  
TECHNOLOGY



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

دوره دوم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۷

# IRCCP

● چرا استاندارد مرکزی IRCCP

● هیئت ملی آزمون‌های غیرمخرب هوانوردی (NANDTB)

● ارزیابی خوردگی در لوله‌های انتقال آمونیاک توسط پرتونگاری دیجیتال و موجک مختلط

● تخمین شکل و ابعاد ترک‌های سطحی ساختارهای فلزی در روش آزمون جریان گردابی

## فهرست مطالب

سخن سردبیر.....	۶
تاریخچه نظام‌های تایید صلاحیت کارکنان آزمون‌های غیرمخرب در ایران .....	۷
چرا استاندارد مرکزی IRCCP .....	۱۰
هیئت ملی آزمون‌های غیرمخرب هوانوردی (NANDTB) .....	۱۴
تعیین عیوب زیر سطحی روی قطعات فلزی در آزمون‌های غیرمخرب با روش برش‌نگاری لیزری به کمک بارگذاری حرارتی.....	۱۹
چالش‌های بازرسی دوره ای کپسول‌های CNG فولادی در کشور و عیوب محتمل در کپسول‌ها .....	۲۶
ارزیابی خوردگی در لوله‌های انتقال آمونیاک توسط پرتونگاری دیجیتال و موجک مختلط .....	۳۲
عیب‌یابی به روش فراآوایی بر روی لبه در آزمون خودکار با روش امتداد قطعه .....	۳۸
تخمین شکل و ابعاد ترک های سطحی ساختارهای فلزی در روش آزمون جریان گردابی .....	۴۲
ارزیابی غیرمخرب گلوله‌های آسیا چدن پرکروم توسط آزمون جریان گردابی.....	۴۹
شناسایی سریع محصول آلوده به سم آفت‌کش با روش‌های نوین فناوری آزمون غیرمخرب .....	۵۸
رویدادهای پیش‌رو .....	۶۶



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

نشریه علمی-ترویجی

## فناوری آزمون‌های غیرمخرب

**NONDESTRUCTIVE TESTING  
TECHNOLOGY**

(این نشریه مسئولیتی در قبال محتوای مقالات و تبلیغات ندارد)

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 جواهری‌پور، دکتر

امیر رفاهی‌اسکویی، دکتر بهروز رک‌رک، دکتر

محمدحسین سورگی، دکتر سیدحسین صادقی، دکتر

محمدرضا فراهانی، مهندس میرمجید قائمی و دکتر

فرهنگ هنرور

ویراستار: مهندس میثم باباپور

طراحی و صفحه‌آرایی: مهندس محمد محمودی

نشانی: تهران، خیابان کریمخان زند، نبش خیابان آبان

شمالی، ساختمان دانشگاه علامه طباطبائی، طبقه دوم،

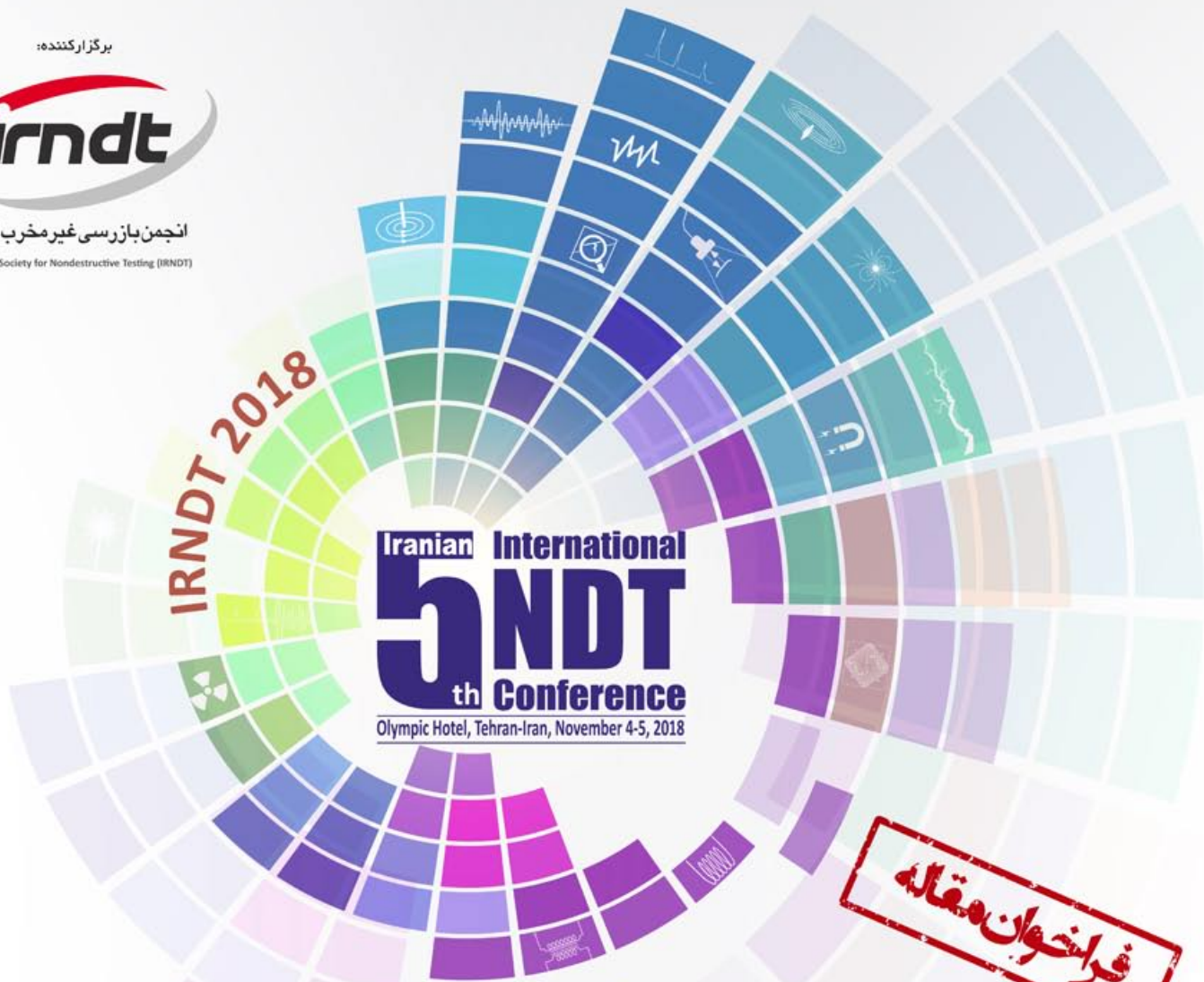
اتاق ۲۲۷، دفتر انجمن بازرسی غیرمخرب ایران

تلفن: ۰۲۱-۸۱۰۳۲۲۲۵

www.irndt.org - jndttech@irndt.org



انجمن بازرسی غیر مخرب ایران  
Iranian Society for Nondestructive Testing (IRNDT)



**Iranian International**  
**5th NDT**  
**Conference**  
Olympic Hotel, Tehran-Iran, November 4-5, 2018

**فراخوان مقاله**

پنجمین کنفرانس بین المللی

# آزمون‌های غیرمخرب ایران

۱۳ و ۱۴ آبان ۱۳۹۷ - تهران - هتل المپیک

### اهداف کنفرانس:

- معرفی آخرین دستاوردهای علمی و فناوری در زمینه آزمون‌های غیرمخرب
- فراهم نمودن زمینه تبادل تجربیات علمی و فنی متخصصین دانشگاهی و صنعتی
- تقویت ارتباطات بین المللی مراکز علمی پژوهشی و صنعتی در زمینه آزمون‌های غیرمخرب

### تاریخ‌های کلیدی:

- آخرین مهلت ارسال مقالات کامل: ۱۳۹۷/۰۶/۱۶
- اعلام نتایج داوری مقالات کامل: ۱۳۹۷/۰۷/۲۰
- آخرین مهلت ارسال مقالات ویرایش شده: ۱۳۹۷/۰۷/۲۵

### محورهای کنفرانس:

- دانش و مبانی علمی و پژوهشی روش‌های ارزیابی غیرمخرب
- روش‌های صوتی و فراصوتی، پرتونگاری، الکترومغناطیسی، حرارتی، مایکروویو و نوری
- مشخصه‌یابی مواد و ارزیابی غیرمخرب مواد پیشرفته
- کاربرد روش‌های آزمون غیرمخرب
- پایش سلامت و پیش‌بینی عمر سازه‌های مهندسی
- روش‌های پیشرفته آزمون‌های غیرمخرب
- کاربرد آزمون‌های غیرمخرب در صنعت انرژی
- کاربرد آزمون‌های غیرمخرب در صنعت هوایی
- کاربرد آزمون‌های غیرمخرب در صنعت راه و ساختمان
- کاربرد آزمون‌های غیرمخرب در خدمات شهری شامل ایمنی شهرسازی و تله‌کابین و مهندسی ترافیک

### ارزیابی کارکنان آزمون‌های غیرمخرب

- آموزش
- تایید صلاحیت
- استانداردسازی

با گسترش علم و فناوری، امروزه شاهد رشد و توسعه صنایع مهمی نظیر نفت و گاز، نیروگاهی، هوا-فضا، ساختمان و خودرو در داخل کشور هستیم. رسیدن به کیفیت مطلوب و حفظ استاندارد در محصولات تولیدی در این صنایع و ارتقاء قابلیت اطمینان سیستم‌های موجود، نیازمند انجام بازرسی‌های دقیق و پایش سلامت آنها است. این موضوع منجر به گسترش بیش از پیش کاربرد روش‌های آزمون غیرمخرب شده است. با توجه به حساسیت روزافزون جامعه نسبت به ارتقاء کیفیت و ایمنی خدمات و محصولات، انجمن بازرسی غیرمخرب ایران (IRNDT) با هدف شناسایی یافته‌های جدید و تبادل تجربیات در حوزه آزمون‌های غیرمخرب اقدام به برگزاری کنفرانس‌های ملی و بین‌المللی نموده است. نظر به استقبال چشمگیر جامعه علمی و صنعتی کشور در چهار کنفرانس گذشته، اینک انجمن بازرسی غیرمخرب ایران افتخار دارد پنجمین کنفرانس بین‌المللی آزمون‌های غیرمخرب ایران (IRNDT 2018) را با همکاری نهادهای علمی و صنعتی فعال در حوزه آزمون‌های غیرمخرب برگزار نماید. از تمامی علاقمندان و دست‌اندرکاران در این حوزه دعوت می‌شود که با مشارکت فعال خود در برگزاری هرچه باشکوه‌تر این رویداد مهم ما را یاری نمایند.





# Aram Azmoon Co.



شرکت آرام آزموون ، خدمات و آموزش آزمونهای غیر مخرب در صنعت هواپیمائی  
AVIATION NON-DESTRUCTIVE TESTING SERVICES & TRAINING CENTER



“عضو حقوقی انجمن بازرسی غیر مخرب ایران”



اتحادیه صنایع هوایی و فضایی ایران

“پنجمین عضو اتحادیه صنایع هوایی و فضایی ایران”

Established since 1996  
part 145 certificate from IRAN CAO

سال تأسیس ۱۳۷۶  
دارای مجوز Part 145 از سازمان هواپیمائی کشوری

اخذ عنوان شرکت **دانش بنیان** از معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری از سال ۱۳۹۴  
**لیست خدمات :**

- ارائه خدمات آزمون های غیر مخرب با استفاده از جدیدترین تجهیزات روز دنیا و متخصصین مورد تائید سازمان هواپیمائی کشوری
- ارائه خدمات Responsibility LEVEL III
- مشاوره ، تجهیز و راه اندازی واحد NDT
- تهیه کلیه اقلام مورد نیاز واحدهای آزمون های غیر مخرب
- مشاوره فنی در خرید هواپیما و موتور



## تولید کننده تجهیزات NDT

چراغهای UV – پرابهای ادی کارنت – قطعات مرجع – کفشکهای آتراسونیک – کیت های بازرسی و انواع کابل های ET & UT  
راه اندازی **واحد چرخ و ترمز هواپیما** با اخذ تاییدیه و مجوز از سازمان هواپیمائی کشوری بر اساس مقررات PART 145

نمایندگی انحصاری شرکتهای ذیل:



تجهیزات UT&RT



تعمیر و کالیبره تجهیزات ET



تجهیزات ET



مرکز آموزشی



تجهیزات VT



TEL/FAX: +9821-66011915 , 66044018 , 44657182 , 44657317 Mobile: +98-912-3800917

P.O.BOX: 13445-774 Tehran-Iran Website: www.aa-ndt.com E-mail: info@aa-ndt.com

# شرکت پرتو کاران تابش



وارد کننده و عرضه کننده تجهیزات بازرسی فنی و آزمونهای غیر مخرب



- \* فیلم های پرتونگاری صنعتی برند Foma کشور چک
- \* مواد مصرفی PT و MT برند MagnaFlux انگلستان
- \* دستگاه های دیجیتال رادیوگرافی CR و DR برند آلمان Durr
- \* دستگاه Phased Array برند Doppler چین
- \* دستگاه عیب یاب و ضخامت سنج التراسونیک برند Doppler چین
- \* تجهیزات سختی سنجی برند Novotest اوکراین
- \* تجهیزات بازرسی رنگ برند Novotest اوکراین
- \* دستگاه عیب یاب و ضخامت سنج التراسونیک برند Novotest
- \* دستگاه اشعه ایکس و کرالر ایکس برند HRNDT چین
- \* ویور و دانسیتومتر برند LCNDT چین و Digit-X انگلستان
- \* تجهیزات اندازه گیری اشعه ( دزیتر فردی و محیطی )



عیب یاب التراسونیک سه بعدی Phased Array



اسپری های ترک یاب



عیب یاب التراسونیک Novotest



دوربین رادیوگرافی و دستگاه اشعه X



ویور و دانسیتومتر



لامپ UV و یوک مغناطیسی



عیب یاب التراسونیک Doppler



تجهیزات بازرسی رنگ و روکش Novotest



سختی سنج ترکیبی Novotest



دزیتر های محیطی

آدرس : تهران-خیابان شیخ بهائی شمالی بالاتر از میدان شیخ بهایی روبروی امداد خودرو ایران پلاک ۶۹ واحد یک

تلفن: ۰۲۱-۸۸۶۱۳۷۹۵-۶ فکس: ۸۸۶۰۲۶۳۳ www.partokaran-tabesh.com



## سخن سردبیر

باعث خوشحالی است که دومین شماره مجله علمی-ترویجی انجمن بازرسی غیرمخرب ایران (IRNDT) را با مطالب و مقالات متنوع علمی و فنی به شما ارائه دهیم. با توجه به حساسیت موضوع احراز شرایط و صدور گواهی‌نامه کارکنان آزمون‌های غیرمخرب و فعالیت‌های گسترده انجمن در ساماندهی این امر، در این شماره از مجله نیز چند مقاله به این موضوع اختصاص یافته است.

در مقالات علمی این شماره از مجله نیز موضوعات متنوعی مورد بررسی قرار گرفته است که مباحثی نظیر برش‌نگاری لیزری، آزمون فراصوتی، آزمون جریان گردابی، پرتونگاری دیجیتال و کاربردهای آزمون غیرمخرب در محصولات کشاورزی را در بر می‌گیرد.

با توجه به اینکه پنجمین کنفرانس بین‌المللی آزمون‌های غیرمخرب ایران (IRNDT 2018) در آبان ماه سال جاری در تهران برگزار خواهد شد، از این فرصت استفاده کرده و از تمامی دست‌اندرکاران و علاقمندان NDT دعوت می‌کنم تا در این کنفرانس شرکت نمایند. همچنین، موجب خوشبختی است اگر اساتید، دانشجویان، مهندسين و متخصصان حوزه بازرسی فنی و آزمون‌های غیرمخرب آخرین دستاوردهای علمی و صنعتی خود را در قالب مقالات علمی به کنفرانس ارسال نمایند. همانند کنفرانس‌های قبلی، در این کنفرانس نیز مقالات برگزیده در مجله «فناوری آزمون‌های غیرمخرب» به چاپ خواهند رسید. در پایان، لازم است از کلیه عزیزانی که ما را در چاپ این شماره از مجله یاری کرده‌اند، اعم از نویسندگان مقالات، هیئت محترم تحریریه و آقایان دکتر ابونجمی - مدیر داخلی مجله، آقای مهندس باباپور - ویراستار و آقای مهندس محمودی - طراح و صفحه‌آرای مجله، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. امیدوارم این شماره از مجله نیز مورد توجه خوانندگان محترم قرار گیرد و با ارسال نظرات خود ما را در بهتر ساختن مجله یاری نمایند.

فرهنگ هنرور

سردبیر

## تاریخچه نظام‌های تایید صلاحیت کارکنان آزمون‌های غیرمخرب در ایران

ناصر راستخواه

رئیس سابق مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور  
nrastkhah@yahoo.com

هر کسی از ظن خود شد یار من، وز درون من نجست اسرار من

شاید بحث ساماندهی از اولین دغدغه‌های تمام تشکل‌هایی است که در زمینه بازرسی فعالیت می‌نمایند. اگرچه صلاحیت تمامی افراد در سپردن مسؤلیت به آن‌ها مهم است، اما به جهت قرار گرفتن فرایند بازرسی فنی و آزمون‌های غیرمخرب در انتهای عملیات کنترل کیفی محصول، صلاحیت کارکنان در این رشته تخصصی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هر چند در این زمینه تلاش‌های بسیاری صورت گرفته است، لیکن همواره در خصوص موضوع "نظام تایید صلاحیت کارکنان آزمون‌های غیرمخرب"، بیش از خود مفهوم "نظام"، به موضوعات حاشیه‌ای پرداخته شده است و چه بسا این امر در عدم توفیق چشمگیر این ساماندهی هم بی‌تاثیر نبوده باشد. در واقع ممکن است در تشخیص نیازهای کلان به خطا رفته باشیم و لذا منافع کوتاه مدت را ترجیح داده‌ایم. بی‌شک ثمره تلاش‌های طولانی مدت، گرچه ممکن است طاقت فرسا باشد، ولی قطعاً حلاوت بیشتری خواهد داشت.

با قدردانی از اقدامات انجمن بازرسی غیرمخرب ایران در تشکیل شورای تایید صلاحیت و صدور گواهی‌نامه، تدوین برنامه مرکزی گواهی کارکنان آزمون‌های غیرمخرب (IRCCP)<sup>۱</sup> و تهیه دستورالعمل‌های مرتبط، چندی پیش از طرف این شورای محترم پیشنهاد شد تا تاریخچه‌ای از آنچه که در رابطه با موضوع ساماندهی و تایید صلاحیت کارکنان بازرسی فنی و آزمون‌های غیرمخرب در طول سالیان گذشته در کشور انجام شده است، مطرح نمایم تا در دسترس علاقه‌مندان قرار گیرد. لذا با استقبال از این پیشنهاد، در وسع هر چند اندک خود، در این یادداشت مراحل گذر از توسعه بکارگیری روش‌های آزمون‌های غیرمخرب در کشور در زمان بعد از انقلاب و ایجاد زمینه نظام تایید صلاحیت در کشور را مرور خواهیم کرد. باشد که با استفاده از تجربیات و بهره‌گیری و کسب آرا صاحب نظران، الگوی مناسب در کشور در این زمینه اجرایی شود.

### شروع کار در زمینه آزمون‌های غیرمخرب

اینجانب از سال ۱۳۶۴ پس از گذراندن دوره آموزشی در آلمان، فعالیت در زمینه آزمون‌های غیرمخرب را در سازمان انرژی اتمی ایران شروع کردم. با شروع طرح‌های ملی کشور، از طریق شرکت وابسته به سازمان، از سال ۱۳۶۸ در طرح پالایشگاه کنگان و فولاد مبارکه و متعاقباً در طرح‌های نفت، گاز، پتروشیمی، خطوط لوله و نیروگاهی مسولیت‌های انجام آزمون‌ها و بازرسی را بر عهده داشتم. اگرچه در طرح‌ها از پیمانکاران خارجی استفاده می‌شد، لیکن بنا به ضوابط سازمان انرژی اتمی ایران ابتدا انجام رادیوگرافی توسط شرکت‌های ایرانی و سپس کلیه آزمون‌ها به شرکت‌های تخصصی ایرانی سپرده شد. لذا از نزدیک شاهد توسعه و بکارگیری این روش‌ها و قابلیت کارکنان در انجام آزمون‌ها بودم.

### اولین گواهی‌نامه‌های صادر شده

اگرچه از روش‌های مختلف آزمون‌های غیرمخرب در صنایع و طرح‌های کشوری استفاده شده است، ولی شواهدی از نیاز به ارائه مدرکی دال بر توانایی شخص در انجام آزمون‌ها تا حدود سال‌های ۱۳۶۸ - ۱۳۶۹ وجود ندارد. عمدتاً با اعلام نیاز شرکت‌های خارجی حاضر در طرح‌ها ارائه گواهی‌نامه‌های "حفاظت در برابر اشعه" که (به زبان فارسی) برای پرتونگاران صادر

<sup>۱</sup> - IRNDT Central Certification Program for NDT Personnel

می‌گردید کیفیت می‌نموده است. اولین بار در طرح فولاد مبارکه، کارشناسان ایتالیایی متوجه موضوع شده و با استعلام از سازمان انرژی اتمی ایران و مشخص شدن نقص، اقدام به ایجاد نظام صدور گواهی‌نامه بر اساس رویه SNT-TC-1A در مجتمع فولاد مبارکه نمودند. نکته جالب توجه این است که گواهی‌نامه‌های "موقت" و "معتبر" صادر شده توسط کارشناس ایتالیایی دارنده گواهی‌نامه سطح سه آزمون‌های غیرمخرب برای مجتمع یاد شده، برای سال‌های بعد و در طرح‌های دیگر و شرکت‌های دیگر نیز مورد استفاده قرار می‌گرفته است!

در همان سال‌ها شرکت ملی گاز ایران نیز در طرح‌های کلان خود در بخش مدیریت بازرسی فنی، اقدام به گرفتن آزمون و صدور گواهی‌نامه، بدون مرجع و استاندارد مشخصی نموده است. به نظر می‌رسد شرکت ملی گاز ایران جهت اطمینان از درستی تفسیر فیلم‌های تهیه شده در طرح‌های گاز رسانی اقدام به اینکار نموده است.

ابتدا طرح و لزوم داشتن گواهی‌نامه تایید صلاحیت، موجب توجه به موضوع شده و متعاقباً تمایل به داشتن آموزش و کار تخصصی در این زمینه را افزایش داد. به مرور در سطوح مهندسی نیز علاقه به بازرسی غیرمخرب بیشتر شد، لیکن اقدام خاص در سطح کشور انجام نشده و متولی خاصی نیز موضوع را پیگیری نکرد. با بهره‌مندی از رویه SNT-TC-1A، مجتمع‌ها و شرکت‌های بزرگ صنعتی ترجیح دادند از متخصصین دارای گواهی‌نامه سطح سه آزمون‌های غیرمخرب در پروژه‌های خود استفاده نمایند و موضوع زمانی تاسف بار شد که گاهی اوقات از امضای فرد دارنده گواهی‌نامه سطح سه در شرکت‌ها و کارگاه‌هایی استفاده شده است که شخص امضا کننده هیچ مسئولیتی در آن‌ها نداشته است.

علی‌رغم توسعه صنایع و بکارگیری وسیع‌تر روش‌های آزمون غیرمخرب، و به تبع آن افزایش تعداد کارکنان در این رشته، می‌توان اظهار داشت که در مورد تایید صلاحیت کارکنان آزمون‌های غیرمخرب به غیر از برخی موارد مقطعی، اقدام مناسبی صورت نگرفته است.

### طرح استقرار استاندارد ISO 9712 در ایران

با توجه به ارتباط سازمان انرژی اتمی ایران با آژانس بین‌المللی انرژی اتمی و استفاده از ظرفیت همکاری‌های فنی با آژانس، در سال ۱۳۷۷ زمینه حضور ایران در طرح منطقه‌ای "تشکیل نظام پایدار و معتبر برای قابلیت و صلاحیت کارکنان آزمون‌های غیرمخرب" فراهم گردید و این طرح از سال ۱۳۷۸ به مدت ۳ سال ادامه یافت. این طرح با حضور بیش از ۱۵ کشور منطقه و با استفاده از مدرک آژانس که با عنوان IAEA Training Course Series No.35 در سال ۲۰۰۹ میلادی منتشر شده بود ایجاد گردید و منطبق بر ISO 9712: 2005 و با در نظر گرفتن استاندارد ISO/IEC 17024: 2003 با هدف افزایش توانمندی کشورهای عضو در طرح تشکیل نظام تایید صلاحیت و با توجه به سابقه کشورهای توسعه یافته و ایجاد هماهنگی در شناسایی نظام‌های تایید صلاحیت به منظور استفاده از تخصص افراد در سطح بین‌المللی صورت گرفت. در این سه سال اقدامات زیر در کشور صورت پذیرفت:

- ۱- آموزش حدود ۳۰۰ نفر از کارشناسان صنایع مختلف کشور در روش‌های مختلف آزمون‌های غیرمخرب در سطح ۲ و ۳ توسط کارشناسان آژانس بین‌المللی انرژی اتمی
- ۲- تدوین استاندارد ملی بر اساس آخرین نسخه ISO 9712 با همکاری موسسه (سازمان) ملی استاندارد ایران و مشارکت متخصصین وقت کشور که اولین نسخه آن با عنوان "آزمون غیرمخرب - اثبات شرایط و صدور گواهی" به شماره ISIRI- 6725 در تاریخ ۱۳۸۳ منتشر گردید. این استاندارد در ویرایش‌های بعدی به INSO-ISO 9712 تغییر نام یافته که آخرین ویرایش آن در سال ۱۳۹۶ منتشر شده است.
- ۳- تجهیز آزمایشگاه مرجع جهت اخذ آزمون‌های غیرمخرب براساس استاندارد ISO 9712
- ۴- اقدام در جهت استقرار استاندارد ISO 9712

اگرچه بررسی جزئیات موارد فوق در این مجال ممکن نیست ولی به جهت ارتباط با موضوع، به اختصار مواردی ذکر می‌گردد: این استاندارد بر پایه "نظام تایید صلاحیت مرکزی یا شخص سوم" بوده لذا ساختارهای مناسبی در استقرار آن لازم است. (علاقه‌مندان برای مطالعه بیشتر در این خصوص می‌توانند به مقالاتی که در صفحات ۳ الی ۶ و ۷ الی ۹ از شماره قبلی این

نشریه منتشر گردیده است مراجعه نمایند) از آنجا که چنین ساختاری در آن سالها وجود نداشت، لذا با هماهنگی در بالاترین سطوح سازمان ملی استاندارد ایران و سازمان انرژی اتمی ایران مقرر شد تا زمان ایجاد ساختارهای مناسب، "شورای تایید صلاحیت" در مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور تشکیل شده و شرایط لازم فراهم گردد. لذا با اقدامات پیگیر، این شورا با اعضای (با عناوین وقت):

- ۱- آقای دکتر خلیلی پور، معاون سازمان و رئیس مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور
- ۲- آقای دکتر اعتماد، مدیر کل ایمنی هسته‌ای کشور
- ۳- آقای مهندس راستخواه، مدیر کل حفاظت در برابر اشعه کشور
- ۴- آقای مهندس شیرزادیان، مشاور رئیس مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور
- ۵- آقای دکتر ریاحی، مدیر کل سیستم‌های کیفیت و مدیر اجرایی نظام تایید صلاحیت
- ۶- آقای مهندس جابریان، کارشناس سیستم‌های کیفیت موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران
- ۷- آقای مهندس ادب‌آوازه، رئیس انجمن جوشکاری و آزمایش‌های غیرمخرب ایران
- ۸- آقای مهندس آقایی، مدیر عامل شرکت پالایش و پخش فراورده‌های نفتی ایران
- ۹- آقای دکتر هنرور، عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
- ۱۰- آقای مهندس شریفی، رئیس انجمن صنفی آزمایش‌های غیرمخرب

تشکیل و در ۲۷ مهر ماه ۱۳۸۳ اساسنامه آن با امضای کلیه اعضا به تصویب رسید. مصوبه این شورا در تاریخ ۳ شهریور همان سال به مدیریت مرکز تکنولوژی حفاظت و ایمنی هسته‌ای وقت نظام ایمنی هسته‌ای کشور ابلاغ شد تا مسولیت مرکز آزمون را در نظام تایید صلاحیت بر عهده داشته باشد.

لازم به یادآوری است که با توجه به فراهم بودن تجهیزات بروز، کارشناسان آزموده و فرایندهای استاندارد، امتحانات آزمون‌های غیرمخرب در حال حاضر نیز در این مرکز انجام می‌پذیرد. لیکن ساختار مناسب منطبق بر استاندارد ملی ISO 9712 در این مدت در کشور فراهم نیامده است و با وجود بهره‌مندی از تخصص‌های خوب، روش‌های مناسب و توسعه فناوری در کشور، کماکان کشور فاقد ساختار مناسب "برای استقرار نظام تایید صلاحیت مرکزی کارکنان آزمون‌های غیرمخرب" منطبق بر استاندارد مذکور است. مسلماً ادامه شرایط موجود، به مرور زمان وجود و فعالیت این مرکز را نیز مورد سوال قرار خواهد داد. اگرچه دلایل آن نیازمند واکاوی و چاره‌جویی است، اما تلاش‌های تعداد معدودی از علاقمندان به ساماندهی همواره ادامه یافته است.

### تشکیل انجمن بازرسی غیرمخرب

آگاهی از مشکلات استقرار استاندارد و آشنایی با روش‌های مدرن بازرسی غیرمخرب در کشورهای توسعه یافته عزم دوستان را در تشکیل انجمن مرتبط با موضوع در کنار وظایف دیگری که یک انجمن علمی می‌تواند دنبال کند، جزم و پس از سال‌ها هم‌فکری، با پیشنهاد جمعی از پیشکسوتان و دست‌اندرکاران این حوزه از سال ۱۳۸۸، زمینه تشکیل انجمن بازرسی غیرمخرب ایران در مهرماه سال ۱۳۹۱ توسط هیئت موسسین فراهم آمد. ساماندهی نظام "تایید صلاحیت کارکنان آزمون‌های غیرمخرب" از ابتدای تشکیل انجمن مورد توجه قرار گرفت و در موضوعات کنفرانس‌های برگزار شده مطرح و در نشریه انجمن نیز منعکس شده است. اتفاق نظر در نامناسب بودن شرایط موجود و آسیب‌های مرتب بر پیکره جامعه بازرسی فنی و آزمون‌های غیرمخرب کشور، لزوم تلاش مضاعف را بیش از پیش مشخص کرده است. آنچه که مسلم است این است که جلب توجه دستگاه‌های حاکمیتی، ارتباط و تبیین ساختار ساماندهی در دستگاه‌های اجرایی و همکاری با انجمن‌های مرتبط راه دشوار پیش‌رو را سهل‌تر خواهد کرد.

## چرا استاندارد مرکزی IRCCP\*<sup>۱</sup>

میرمجید قائمی

کارشناس سطح سه آزمون‌های غیرمخرب، نایب رئیس انجمن بازرسی غیرمخرب ایران  
mirmajidghaemi@gmail.com

برای تایید صلاحیت و صدور گواهینامه کارکنان آزمون‌های غیرمخرب در سطح جهانی دو نوع استاندارد و در سه سطح ۱، ۲ و ۳ معمول است. در این خصوص دو مقاله بسیار جامع و مفیدی در شماره پیشین این نشریه به قلم دیگر اعضا و همکاران متخصص انجمن منتشر گردیده است که علاقه‌مندان را به مطالعه آن‌ها دعوت می‌نماید. از همین رو در این مقاله تنها به اجمال به دو نوع استاندارد مذکور اشاره شده و در ادامه به طرح دو پرسش مهم و ارائه پاسخ به آن‌ها پرداخته می‌شود.

### ۱- استانداردهای کارفرمایی (شخص دوم):<sup>۲</sup>

طبق این نوع استانداردها هر کارفرمایی می‌تواند مطابق نیازش کارکنان بازرسی فنی و آزمون‌های غیرمخرب شاغل در واحد خود را آموزش داده و پس از اخذ امتحان و گذراندن مرحله کارآموزی گواهی‌نامه خاص خود را صادر نماید. مسئولیت کامل این گواهی‌نامه به‌عهده همان کارفرما است و گواهی‌نامه صرفاً نزد همان کارفرما اعتبار دارد و با خروج دارنده گواهی‌نامه از استخدام آن کارفرما گواهی‌نامه مذکور نیز از درجه اعتبار ساقط می‌شود و نزد کارفرمای دیگر فاقد اعتبار است، مگر اینکه کارفرمای جدید آن را با شرایط خودش تطبیق دهد و راساً گواهی‌نامه جدید صادر نماید. اولین مدل چنین استandarادی در سال ۱۹۶۶ توسط انجمن آزمون‌های غیرمخرب آمریکا (ASNT) بصورت آیین‌نامه SNT-TC-1A تدوین شد که هنوز هم معتبرترین و متداول‌ترین آیین‌نامه کارفرمایی محسوب شده و در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد و اغلب استانداردهای معتبر کاربردی مثل API، ASME، ASTM و AWS هم به آن ارجاع می‌دهند. مدتی بعد مدل استاندارد شده این آیین‌نامه با عنوان ANSI/ASNT CP-189 همچنین استاندارد ANSI/ASNT CP-06 توسط سازمان ملی استاندارد آمریکا (ANSI) نیز مورد پذیرش قرار گرفت و جزء استانداردهای ملی آمریکا درآمد. از استانداردهای معتبر دیگر کارفرمایی می‌توان به استاندارد مشابهی در صنعت هوانوردی با عنوان NAS 410 که در آمریکا معتبر است و نیز معادل اروپایی آن یعنی EN 4179 اشاره کرد. از مزایای این نوع استاندارد سهل الوصول بودن آن بعلاوه اختیارات وسیع کارفرما در تدوین برنامه آموزشی مطابق نیازهای خاص خود است و البته نقص مهم آن نیز عدم مرکزیت آن و محدودیت اعتبار آن نزد کارفرمای صادرکننده گواهی‌نامه است.

### ۲- استانداردهای مرکزی (شخص سوم):<sup>۳</sup>

استandarادی است که توسط یک مرجع سوم (غیر از کارفرما و کاربر) بعنوان مرجع صدور گواهینامه یا "نهاد گواهی‌کننده"<sup>۴</sup> یا به اختصار CB صادر می‌شود و مختص کارفرمای خاصی نیست و در همه جا اعتبار دارد. در این نوع استاندارد، آموزش و امتحان و گواهی‌نامه برای حوزه‌های تخصصی خاصی مانند مخازن تحت فشار، جوشکاری، ریخته‌گری و غیره صورت می‌گیرد. از نمونه این نوع استاندارد می‌توان به استانداردهای مرکزی ASNT NDT Level II & III یا ASNT ACCP، استاندارد قدیمی EN 473، استاندارد جهانی ISO 9712 و همچنین استاندارد مرکزی CGSB/CAN 9712-48 کانادا و PCN انگلستان نام برد.

\* توضیح: واژه‌ها و کلمات کلیدی بکار رفته در این مقاله بر اساس واژگان مصوب استاندارد ملی INSO-ISO 9712 است.

<sup>۱</sup> - IRNDT Central Certification Program for NDT Personnel

<sup>۲</sup> - Employer-based Systems (Second Party)

<sup>۳</sup> - Central Systems (Third Party)

<sup>۴</sup> - Certification Body

در سال ۲۰۱۴ با هماهنگی ISO و ICNDT، استاندارد مرکزی اروپا (EN 473) با استاندارد ISO 9712 ادغام شد و بدین ترتیب استاندارد ISO EN 9712 به استاندارد منحصر بفرد جهانی تبدیل شد. به دنبال آن ICNDT هم تلاش گسترده‌ای را برای ترغیب انجمن‌های آزمون‌های غیرمخرب عضو خود به اجرای این استاندارد آغاز نمود که در این رابطه یک توافقنامه چند جانبه تحت عنوان MRA<sup>۱</sup> به امضای اغلب انجمن‌های عضو ICNDT رسیده است.

### سابقه موضوع در ایران

از ابتدای دهه ۸۰ شمسی که با توسعه صنایع مختلف و حضور شرکت‌های معتبر خارجی در کشور استفاده از روش‌های NDT نیز بیش از پیش متداول شده بود نیاز به آموزش و صدور گواهی‌نامه برای کارکنان بازرسی فنی و آزمون‌های غیرمخرب نیز جدی‌تر شد. بکارگیری آیین‌نامه SNT-TC-1A سهل‌الوصول و کاربردی‌تر از سایر استانداردها بود و در عین حال مورد تایید اغلب استانداردها بویژه استانداردهای آمریکائی متداول در صنایع مختلف کشور بویژه صنایع نفت و گاز و ساخت تجهیزات نیز بود. از طرف دیگر پیاده‌سازی این آیین‌نامه توسط هر کارفرما با همراهی یک فرد دارای گواهی‌نامه سطح سه امکان‌پذیر می‌شد. متأسفانه بدلیل فقدان انجمن آزمون‌های غیرمخرب در کشور و یک استاندارد مرکزی، بکارگیری این آیین‌نامه با خطاها و اشتباهاتی همراه شد که امروزه دامن‌گیر همه دست‌اندرکاران و کاربران این رشته شده است.

در سال ۱۳۸۲ استاندارد مرکزی ملی براساس استاندارد ISO 9712 توسط سازمان ملی استاندارد ایران و با همکاری متخصصین این رشته با عنوان ISIRI 6725 تدوین و تصویب گردید. با اینکه این استاندارد تاکنون دو بار در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۶ مورد بازبینی قرار گرفته و به INSO-ISO 9712 تغییر نام یافته است ولی متأسفانه بدلائل مختلف امکان اجرای آن فراهم نشده است. البته سازمان انرژی اتمی ایران اقدام به اجرای آن برای سطوح ۱ و ۲ پرتونگاری نموده است ولی با مشکلاتی همراه بوده و هست که مرکز ملی تایید صلاحیت سازمان استاندارد آن‌را به رسمیت نمی‌شناسد.

با تاسیس انجمن بازرسی غیرمخرب ایران در سال ۱۳۹۲ تلاش‌های زیادی جهت روشنگری و بکارگیری صحیح آیین‌نامه SNT-TC-1A بعمل آمد که خوشبختانه نتایج ثمربخشی نیز به همراه داشته است. با همه این موارد در کنار این سیستم کارفرمایی، نیاز کشور به یک استاندارد مرکزی همواره احساس شده است. در چند سال گذشته بحث‌های زیادی در این رابطه در جلسات و شوراهای مختلف انجمن صورت گرفته است و در نهایت انجمن تصمیم گرفت با توجه به اینکه زیرساخت‌های لازم برای اجرای استاندارد INSO-ISO 9712 هنوز فراهم نیست، مشابه کشورهای پیشرفته جهان ابتدا یک استاندارد مرکزی انجمنی تدوین و پیاده شود تا در یک دوره گذار چند ساله، با فراهم‌سازی شرایط و زمینه‌های لازم و بررسی همه جوانب امر، استاندارد مذکور با استاندارد جهانی مطابقت داده شود. سرانجام با تلاش گروهی از همکاران متخصص و مجرب سطح سه، استاندارد مرکزی انجمنی با اقتباس از دو استاندارد مرکزی معتبر ISO EN 9712 و ASNT ACCP و همچنین آیین‌نامه SNT-TC-1A تدوین و تصویب گردید.

### طرح دو پرسش مهم:

در این رابطه دو پرسش مهم از طرف جامعه آزمون‌های غیرمخرب و کاربران این رشته مطرح است:

### سؤال اول:

با وجود آیین‌نامه SNT-TC-1A که اغلب استانداردهای کاربردی مورد استفاده در صنایع ما آن را می‌پذیرند و هر دارنده گواهی‌نامه سطح سه آزمون‌های غیرمخرب می‌تواند آن‌را برای هر کارفرمای متقاضی پیاده نماید و در ۲۰ سال اخیر پاسخگوی نیازهای کشورمان بوده چه نیازی به استاندارد مرکزی است؟ کما اینکه نسخه ملی استاندارد مرکزی ISO 9712 در ۱۲ سال گذشته با اینکه دو بار هم تجدید نظر شده ولی عملاً بدون استفاده بوده و اجرایی هم نشده است.

<sup>۱</sup> - Multilateral Recognition Agreement

## پاسخ به سؤال اول:

ما معتقدیم که مشابه سایر کشورها بویژه کشورهای پیشرفته وجود هر دو سیستم کارفرمایی و مرکزی ضروری است و این دو سیستم نه تنها رقیب هم نیستند بلکه لازم و ملزوم همدیگر و در واقع مکمل هم هستند. در کشور آمریکا با وجود استاندارد مرکزی از سالیان دور برای سطوح دو و سه در دو شکل ASNT Level II & III (بصورت فرارشته‌ای و بدون امتحان عملی) و ASNT ACCP Level II & III (بصورت رشته‌ای و همراه با امتحان عملی) هرگز استانداردها و آیین‌نامه‌های کارفرمایی مانند SNT-TC-1A یا NAS 410 منسوخ نشده‌اند و برخی صنایع مثل صنایع هوایی اصولاً استانداردهای مرکزی را نمی‌پذیرند. اما در ایران متأسفانه بدلیل فقدان استاندارد مرکزی، که همانطور که اشاره شد لازمه‌اش وجود یک مرجع یا نهاد گواهی‌کننده (CB) است، به آیین‌نامه کارفرمایی SNT-TC-1A لباس مرکزی پوشانده‌ایم و هر مرکز آموزشی با بهره‌گیری از خدمات یک فرد دارنده گواهی‌نامه سطح سه، خود را مرکز صدور گواهی‌نامه تلقی نموده و به اصطلاح گواهی‌نامه مرکزی صادر می‌نماید. در حالی که بر اساس آیین‌نامه مزبور صدور این نوع گواهی‌نامه صرفاً بر عهده کارفرما بوده و تنها بر طبق دستورالعمل مکتوب<sup>۱</sup> خاص همان کارفرما می‌تواند صادر شود. کارفرمایان در این راستا فقط می‌توانند از خدمات مراکز آموزشی بعنوان یک کارگزار بیرونی<sup>۲</sup> و صرفاً بعنوان فراهم‌کننده بخشی از ملزومات فرایند صدور گواهی‌نامه بهره بگیرند. اما سایر ملزومات از جمله نیاز به تدوین دستورالعمل مکتوب، گذراندن دوره‌های کارآموزی پس از آموزش و قبولی در امتحانات باید توسط خودشان و کارشناس سطح سه تحت اختیارشان فراهم شود. متأسفانه تبعات ناگوار این کجروی روز به روز آشکارتر شده و در غیاب یک مرکز و مرجع هماهنگ‌کننده، کیفیت آموزش و سؤالات و امتحان به نسبت تعدد مراکز آموزشی، متفاوت و سلیقه‌ای شده است. از طرفی همزمان با رکود اقتصادی و با افزایش تعداد آموزشگاه‌ها و دارندگان گواهی‌نامه سطح سه و رقابت بین آن‌ها و افت قیمت‌ها متأسفانه با کاهش روزافزون کیفیت مواجهیم. این امر موجب شده است که ارزش و اعتبار همه این نوع به اصطلاح "گواهی‌نامه‌ها" زیر سؤال رفته و صنایع مختلف کشورمان به همه این مدارک با دید شک و تردید می‌نگرند. متأسفانه اخیراً شاهدیم که با الزامات صورت گرفته در صنعت ساختمان به استفاده از روش‌های بازرسی فنی و آزمون‌های غیرمخرب بویژه در احداث سازه‌های فلزی و همچنین با استقبال فزاینده دانشجویان برای کسب گواهی‌نامه‌های آزمون‌های غیرمخرب، این سوء تفاهمات گسترده‌تر نیز شده است.

حال که انجمن بازرسی غیرمخرب ایران به کمیته جهانی آزمون‌های غیرمخرب (ICNDT) پیوسته و تفاهم‌نامه همکاری یا به اصطلاح خواهرخواندگی با انجمن آزمون‌های غیرمخرب آمریکا (ASNT) نیز امضا نموده است انتظار می‌رود که در سایه تلاشی مضاعف این اوضاع سروسامان گرفته و دست متخلفان و سودجویان از این حوزه بسیار مهم که با جان انسان‌ها سر و کار دارد کوتاه شود. هدف کلی این است که با اجرای استاندارد مرکزی IRCCP و ارزیابی گواهی‌نامه‌های صادر شده فعلی که در یک دوره گذار و بر اساس معیارهای مصوب صورت می‌گیرد و در کنار آن ارزیابی مراکز آموزشی و همچنین اخذ امتحان و صدور گواهی‌نامه مرکزی برای متقاضیان جدید، به مرور اعتماد جامعه صنعتی کشور به این گواهی‌نامه‌ها جلب شده و بطور همزمان صلاحیت انجمن در کمیته جهانی ICNDT و سازمان ملی استاندارد ایران و مرکز تایید صلاحیت کشور نیز به اثبات برسد تا در آینده نزدیک استاندارد IRCCP با استاندارد جهانی ISO EN 9712 مطابقت داده شود.

بدیهی است که در کنار این تلاش برای به ثمر نشاندن و اجرای استاندارد مرکزی تلاش برای استفاده صحیح از استانداردهای کارفرمایی مثل SNT-TC-1A و EN 4179 نیز دو چندان خواهد شد.

## سؤال دوم:

حال که استاندارد جهانی ISO 9712 به مرور در سراسر جهان در حال پیاده شدن است و استاندارد اروپائی EN 473 نیز در آن ادغام شده و ICNDT هم در اجرای آن از طریق انجمن‌های عضو خود تلاش می‌کند و همگام با آن، کشورهای دارای

<sup>۱</sup> - Written Practice

<sup>۲</sup> - Outside Agency

استاندارد مرکزی هم در حال تطبیق و گذار به آن هستند و در کشور ما هم INSO-ISO 9712 به عنوان استاندارد ملی به رسمیت شناخته شده است چرا مستقیماً آن را پیاده نمی‌کنیم و قصد داریم از طریق استاندارد IRCCP پلی به آن بزنیم؟

### پاسخ سؤال دوم:

اولاً استاندارد ISO EN 9712 هنوز در سطح دنیا معمول نشده است و اشکالات متعددی دارد که باید به مرور رفع شود به طوری که نسخه جدید آن در حال حاضر در کمیته ISO/TC135-SC7 در حال تدوین است و کشورهای پیشرو هم با احتیاط با آن برخورد می‌کنند و استاندارد مرکزی خود را منسوخ نکرده و در تلاشند با دوراندیشی و تمهیدات مناسب آن را با ISO EN 9712 مطابقت دهند. تجربه نشان داده است که اجرای استاندارد ISO EN 9712 در کشورهایی مانند کانادا، استرالیا، انگلستان، اتریش و ژاپن که "به مرور" استاندارد مرکزی خود را با آن هماهنگ کرده‌اند موفق بوده است. حتی آمریکا که مهد تولد هر دو نوع سیستم تایید صلاحیت کارفرمایی و مرکزی بوده و سال‌هاست که انجمن آزمون‌های غیرمخرب این کشور (ASNT) کلیه شرایط و زیرساخت‌های لازم برای پیاده‌سازی استاندارد ISO EN 9712 از جمله الزامات استاندارد احراز صلاحیت نهاد گواهی‌کننده (ISO 17024) را داراست اما هنوز ادعای صدور گواهی‌نامه ISO EN 9712 را نکرده است و بلکه هدفشان این است که تا پایان سال جاری با تکمیل پیش‌نیازهای لازم، تنها عنوان ISO EN 9712 را به استاندارد مرکزی ASNT ACCP اضافه نمایند.

نکته مهم دیگر آن است که از آنجایی که طبق استاندارد ISO EN 9712 محدودیت خاصی برای صدور مجوز برای نهادهای گواهی‌کننده (BC) وجود ندارد، امروزه در اقصی نقاط جهان مؤسسات زیادی با کیفیت‌ها و عملکردهای متفاوت به عنوان نهاد گواهی‌کننده یا مرجع صدور گواهی‌نامه برای کارکنان آزمون‌های غیرمخرب ثبت شده است که هم آموزش می‌دهند، هم امتحان می‌گیرند، و هم گواهی‌نامه صادر می‌کنند. این مراکز در موارد زیادی امر آموزش و اخذ امتحان را به مؤسسات دیگری واگذار می‌کنند که کیفیت کار آن‌ها نیز با یکدیگر متفاوت بوده و این امر باعث افت اعتبار این گواهی‌نامه‌ها و عدم هم‌ترازی آن‌ها شده است. مثلاً در کشور آلمان ۷ مرجع تایید شده بعنوان نهاد گواهی‌کننده فعال هستند که با یکدیگر رقابت می‌کنند و باعث افت کیفیت کار شده‌اند. در حال حاضر نیز شرکت‌هایی از کشورهای دیگر از طریق کارگزارانی فاقد صلاحیت به راحتی و حتی بطور غیابی گواهی‌نامه‌های ISO EN 9712 در کشور ما صادر می‌کنند. متأسفانه این آفت جدیدی است که اگر جدی گرفته نشود دامن جامعه بازرسی فنی و آزمون‌های غیرمخرب را خواهد گرفت. این امر مدارک معتبر مطابق با ISO EN 9712 را خدشه‌دار نموده و چه بسا سرنوشتی مشابه برخی استانداردهای ایزو مانند سری ۹۰۰۰ پیدا کند. بنابراین در حال حاضر نهاد گواهی‌کننده یا به اصطلاح همان مرجع صدور گواهی‌نامه ISO EN 9712 هم بسیار مهم است و در آینده مهم‌تر نیز خواهد شد. هم اکنون کشورهایی مانند کانادا و استرالیا و اتریش که دارای "یک" نهاد گواهی‌کننده ISO EN 9712 هستند و آن را با دقت و وسواس لازم اجرا می‌کنند حاضر به قبول گواهی‌نامه‌های ISO EN 9712 صادر شده از سایر نهادهای گواهی‌کننده و معادل‌سازی آن با استاندارد ISO EN 9712 خودشان نیستند.

بنابراین تلاش بر این است که از طریق استاندارد مرکزی و اجرای جدی و غیرتجاری آن توسط انجمن بازرسی غیرمخرب ایران ضمن کسب اعتبار لازم برای انجمن، در آینده نزدیک با دریافت مجوز انحصاری از کمیته جهانی آزمون‌های غیرمخرب ICNDT و مرکز ملی تایید صلاحیت ایران مجری ذیصلاح و منحصر بفرد استاندارد ISO EN 9712 در کشورمان باشیم. آنچه که مسلم است بایستی استاندارد ISO EN 9712 در کشور ما ایران نیز اجرایی شود و این امر مهم از وظایف و اهداف اصلی انجمن است. از طرفی نیز بایستی اذعان نمود که انجمن با امضای توافقنامه (MRA) چند جانبه کمیته جهانی آزمون‌های غیرمخرب خود را متعهد به اجرای آن می‌داند، اما تا زمانی که زیرساخت‌های لازم فراهم نشده است و الزامات استاندارد احراز صلاحیت نهاد گواهی‌کننده یعنی ISO 17024 در ایران به مرحله اجرا در نیامده است لازم می‌نماید که گام به گام و با تمهیدات لازم پیش برویم.

## هیئت ملی آزمون‌های غیرمخرب هوانوردی (NANDTB)<sup>۱</sup>

جلال جواهری پور\*<sup>۱</sup>، مهرداد کهتری<sup>۲</sup>

۱. کارشناس سطح سه و عضو هیئت مدیره انجمن بازرسی غیرمخرب ایران

۲. کارشناس سطح سه و رئیس شورای آموزش انجمن بازرسی غیرمخرب ایران

\*jjpour@iranair.com

آزمون‌های غیرمخرب به عنوان یکی از شاخه‌های کنترل کیفی و گاه اطمینان از مرغوبیت، روش‌هایی هستند که بدون اعمال هر گونه تخریبی قادرند عیوب احتمالی در قطعات، سیستم‌ها و مواد اولیه را شناسایی نمایند. لذا این تخصص و مهارت مورد توجه جهانی قرار گرفته و نگاه خاص به آن را طلب کرده است. آزمون‌های غیرمخرب همواره از منظرهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته و به صورت مستمر توسعه داده شده‌اند. از منظر تجهیزات، سخت افزار و نرم افزار تجهیزات روزبه‌روز توسعه یافته و از منظر روند اجرایی، دستورالعمل‌ها و استانداردها پیوسته تدوین، ویرایش و توسعه یافته است. از منظر عوامل انسانی نیز روند آموزش و اثبات صلاحیت کارکنان توسعه و ارتقاء پیدا کرده است. این رشد و توسعه همه جانبه، حاصل و نتیجه چیزی جز استفاده از خرد جمعی و کار گروهی نیست که به دلایل مختلف در ایران این فرایند هنوز کمتر شکوفا، گسترش و همگانی شده است. هر چند در ایران به تاسی از کشورهای پیشرفته مجامع و انجمن‌های مختلفی تاسیس گردیده ولی بهره لازم از آن گرفته نشده است. در این مختصر ابتدا مقوله اثبات صلاحیت کارکنان و سپس نظام‌های اثبات صلاحیت معرفی می‌گردد و ضمن بررسی روند اثبات صلاحیت کارکنان آزمون‌های غیرمخرب در صنعت هوایی کشور، به نقش پررنگ هیئت ملی آزمون‌های غیرمخرب برای برطرف کردن کاستی‌ها و همچنین مشکلات موجود اشاره می‌شود.

در یک تقسیم بندی می‌توان هر سازمان را متشکل از سه عامل نیروی انسانی، منابع فنی و تجهیزات دانست که عامل نیروی انسانی از اهمیت بسیار بالایی در سازمان‌های طراز اول و پیش‌رو برخوردار است. موضوع نیروی انسانی چنان نقش پراهمیتی دارد که در بسیاری از کتب معتبر در حوزه مدیریت، از آن به عنوان یکی از منابع پر ارزش هر سازمانی یاد شده است. این منبع پر ارزش برای اینکه بالاترین میزان بهره‌وری و اعتبار را داشته باشد باید بخوبی آموزش دیده و از صلاحیت لازم برای احراز شغل مورد نظر برخوردار باشد. در آزمون‌های غیرمخرب نیز مقوله نیروی انسانی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است و سال‌هاست موضوع اثبات صلاحیت کارکنان آزمون‌های غیرمخرب دغدغه بسیاری از انجمن‌ها و سازمان‌های ملی و بین‌المللی در سطح جهان است.

شاید بتوان گفت که نخستین بار انجمن آزمون‌های غیرمخرب امریکا (ASNT)<sup>۲</sup> با تدوین توصیه نامه SNT-TC-1A در سال ۱۳۴۵ هجری شمسی تلاش نمود رویه‌ای برای اثبات صلاحیت کارکنان این تخصص ارائه نماید. سپس نظر به اهمیت موضوع، دیگر کشورهای جهان در غالب استانداردهای مختلف، حداقل الزامات آموزشی، تجربی، امتحانی و معاینات پزشکی را برای کسب صلاحیت و صدور گواهینامه‌های کارکنان آزمون‌های غیرمخرب تدوین و بارها مورد بازنگری قرار دادند.<sup>۳</sup>

بررسی رویه‌ها و استانداردهای ملی و بین‌المللی نشان می‌دهد دو رویکرد کلی نسبت به موضوع اثبات صلاحیت کارکنان آزمون‌های غیرمخرب وجود دارد. در یک رویکرد، مرجع اثبات صلاحیت کارکنان، سازمان‌های ارائه دهنده خدمات آزمون‌های غیرمخرب هستند و در رویکرد دیگر، نهاد ثالثی مستقل از دو سازمان ارائه دهنده و گیرنده خدمات آزمون‌های غیرمخرب به عنوان مرجع شناخته می‌شود. در نظام اثبات صلاحیت شخص دوم<sup>۴</sup> یا کارفرما محور، کارفرما مرجع اثبات صلاحیت کارکنان است و گواهینامه کارکنان مطابق با دستورالعمل تدوین شده توسط کارفرما، صادر می‌گردد. این دستورالعمل تحت عنوان دستورالعمل مکتوب<sup>۵</sup> شناخته می‌شود و کلیه الزامات احراز صلاحیت کارکنان آزمون‌های غیرمخرب در آن ارائه گردیده است.

<sup>1</sup> National Aerospace NDT Board

<sup>2</sup> American Society for Non-Destructive Testing

<sup>3</sup> ANSI CP-189, EN 45013, EN 10256, ISO 20807, ISO 11484, ISO 9712, EN 473, NAS 410, EN 4179

<sup>4</sup> Employer-based or Second Party Systems

<sup>5</sup> Written Practice

در نظام اثبات صلاحیت شخص ثالث<sup>۱</sup> یا مرکزی، صلاحیت کارکنان توسط نهادی تأیید می‌شود که از مرکز اعتباربخشی قانونی، گواهینامه ISO/IEC 17024 دریافت نموده است و نهاد گواهی‌کننده<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. لازم به ذکر است که هم‌اکنون در ایران تنها مرکز اعتباربخشی ملی که زیر نظر سازمان ملی استاندارد ایران فعالیت می‌کند (مرکز ملی تأیید صلاحیت ایران) برنامه‌ای برای ارزیابی نهاد گواهی‌کننده اشخاص در دستور کار خود ندارد. بنابراین امکان استقرار نظام اثبات صلاحیت شخص ثالث مطابق با الزامات استاندارد ISO 9712 میسر نیست.

در گذشته‌ای نه چندان دور، رویکرد شخص دوم و سوم بر اساس معیار منطقه‌ای در صنعت هوایی جهان اجرا می‌شد به طوری که در اروپا بیشتر تمرکز بر رویکرد شخص سوم و مرکزی‌سازی گواهینامه‌ها بود و مطابق با الزامات آژانس ایمنی هوایی اتحادیه اروپا<sup>۳</sup>، کلیه گواهینامه‌های کارکنان آزمون‌های غیرمخرب به صورت مرکزی صادر می‌شد. در آمریکا نظام اثبات صلاحیت شخص دوم مورد پذیرش بود و این تفاوت بین این دو قطب صنعت هوایی دنیا نهایتاً تا سال ۱۳۸۲ ادامه یافت. در سال ۱۳۸۲ آژانس ایمنی هوایی اتحادیه اروپا و سازمان هوایی فدرال آمریکا<sup>۴</sup> با توافق بر یکسان‌سازی دو استاندارد EN 4179<sup>۵</sup> و NAS 410<sup>۶</sup> تصمیم گرفتند با توجه به رشد سریع فن‌آوری و کاهش مشکلات ناشی از فرایند طولانی تصویب استانداردها، از نظام اثبات صلاحیت شخص دوم استفاده نمایند. بدین ترتیب کارفرما به عنوان مرجع اثبات صلاحیت و صدور گواهینامه کارکنان انتخاب گردید. لذا با بررسی‌های مشترک، نخستین بار این دو استاندارد در سال ۱۳۸۷ به طور یکسان از نظر فنی انتشار یافت.<sup>۷</sup>

در اروپا، آژانس ایمنی هوانوردی به منظور نظارت مستقیم بر روند اجرای الزامات این استاندارد، تشکیل مراکز کنترل و نظارت، تحت عناوین "هیئت ملی هوانوردی آزمون‌های غیرمخرب" را تصویب نمود. بدین ترتیب برای کشورهای عضو اتحادیه اروپا رعایت الزامات استاندارد EN 4179 بر اساس مقررات Part 145 و Part 66 الزامی گردید. مطابق این استاندارد، هیئت ملی آزمون‌های غیرمخرب شکل گرفت. این هیئت یک نهاد مستقل تخصصی است که از بین نمایندگان صنعت هوایی که در زمینه آزمون‌های غیرمخرب واجد صلاحیت و تجربه لازم هستند انتخاب می‌گردند. این هیئت منتخب سپس توسط نهاد حاکمیتی صنعت هواپیمایی به رسمیت شناخته شده و وظیفه "نظارت و کنترل بر روند اثبات صلاحیت، امتحان، معاینات پزشکی و صدور گواهینامه کارکنان شاغل در آزمون‌های غیرمخرب صنعت هوایی" را بر عهده دارد.<sup>۸</sup> آخرین ویرایش استاندارد EN 4179 در سال ۱۳۹۶ هجری شمسی با اندکی اصلاحات منتشر شده است.<sup>۹</sup>

در خلال نهمین همایش اروپائی NDT در برلین به منظور همسان‌سازی فعالیت‌های هیئت‌های مختلف، تشکیل مجمع هیئت‌های هوانوردی آزمون‌های غیرمخرب مورد موافقت قرار گرفت و در افتتاحیه ANDTBF<sup>۱۰</sup> جزئیات موضوعات مشترک اعضا، دستورالعمل‌ها، روش‌های کاری و ... مورد بحث قرار گرفت و پس از آن جلسات رسمی ANDTBF مرتب تشکیل شده است.

هم‌اکنون کشورهایمانند آلمان، اتریش، اسپانیا، استرالیا، اسلواکی، اسلوانی، اکراین، انگلستان، ایتالیا، برزیل، بلاروس، بلژیک، بلغارستان، پرتغال، ترکیه، جمهوری چک، چین، دانمارک، روسیه، رومانی، ژاپن، سنگاپور، سوئد، سوئیس، فرانسه،

<sup>۱</sup> Third Party or Central Systems

<sup>۲</sup> Certification Body

<sup>۳</sup> European Aviation Safety Agency

<sup>۴</sup> Federal Aviation Administration

<sup>۵</sup> Certification and Qualification of Non-Destructive Testing for the Aerospace

<sup>۶</sup> National Aerospace Standard-410

<sup>۷</sup> Pr EN 4179 (CEN): Qualification and Approval of Personnel for Non-Destructive Testing, Ed.p3 Feb.2003

<sup>۸</sup> An independent national aerospace organization representing a nation's aerospace industry that is chartered by the participating prime contractors and recognized by the nation's regulatory agencies to provide or support NDT qualification, examination, and/or certification services in accordance with this standard (Paragraph 3.18)

<sup>۹</sup> Pr EN 4179: 2017

<sup>۱۰</sup> Forum for National Aerospace NDT Board

صربستان، فنلاند، جمهوری کره، کرواسی، لتونی، لیتوانی، لهستان، مجارستان، مولداوی، نروژ، هلند، هندوستان، یونان و ... عضو ANDTBF هستند<sup>۱</sup>.

### اهداف و ماموریت‌های ANDTBF در ارتباط با EASA:

- فراهم کردن محیطی برای بحث درباره مسائل مهم مشترک و مورد توجه تمام هیئت‌های عضو.
- هماهنگ سازی روش و اسلوبی برای کنترل آموزش NDT در هوانوردی و امتحانات سطوح متنوع ملی (مطرح شده در EN 4179).
- ارائه رسمی مطالب مشترک اعضای ANDTBF به EASA.
- اجرائی کردن استانداردها و مقررات NANDTB به عنوان یک گروه مشاور منتخب<sup>۲</sup>.
- تفاهم بر اساس مشخصه های مشترک جهت برگزاری آموزش و امتحانات صلاحیت فنی در سطوح متنوع ملی توسط آژانس‌های برون سازمانی.
- تهیه سرفصل‌های مشترک جهت آموزش و برگزاری امتحانات در خصوص پنج متد اصلی مورد کاربرد در بخش هوانوردی.
- تهیه ساز و کار برای تفسیر مواردی که مشاجره بر سر اجرای مقررات و استانداردها وجود دارد.

تمامی این تلاش‌ها و نشست‌های متعدد به منظور رسیدن به رویه و استانداردهایی است که با صرف کمترین هزینه ممکن امکان دستیابی به بهترین نتایج را فراهم نماید و این امر تنها با ابزار هم اندیشی و استفاده از خرد جمعی محقق خواهد شد. روندی که شاید در خیلی از بخش‌های صنعت ایران جدی تلقی نمی‌گردد و اهتمام چندانی به آن نمی‌شود. اگر چه مطابق با بند ۱،۲،۱ استاندارد EN 4179 ویرایش ۲۰۱۷ همانند ویرایش‌های قبلی به این موضوع تاکید شده است که داشتن هیئت ملی آزمون‌های غیرمخرب صنعت هوایی (NANDTB) الزامی نیست اما بنظر می‌رسد آژانس ایمنی هوانوردی اروپا علاوه بر نظارت بر روند اثبات صلاحیت کارکنان آزمون‌های غیرمخرب صنعت هوایی، تلاش دارد تا به گردهم آوردن متخصصان حوزه‌های مختلف این صنعت، بستر مناسبی برای شکوفایی و توسعه ایمنی ایجاد نماید. مطابق استاندارد فوق همانگونه که قبلا اشاره شد هیئت ملی آزمون‌های غیرمخرب یک نهاد مستقل تخصصی است که از بین متخصصان واجد شرایط صنعت هوایی کشور انتخاب می‌گردد و توسط سازمان هواپیمایی کشوری به رسمیت شناخته می‌شود تا به عنوان ابزاری کارا در روند اثبات صلاحیت کارکنان این حوزه ارائه خدمت نماید<sup>۳</sup>. در کشورهایی که این هیئت تشکیل گردد مطابق بند ۴،۴،۲ این استاندارد کارشناسان سطح ۳ مسئول می‌توانند در فرایندهای آموزشی، امتحان‌ها و روند اثبات صلاحیت کارکنان آزمون‌های غیرمخرب نهاد تحت مسئولیت خود، از خدمات این هیئت استفاده نمایند. مطابق استاندارد EN 4179 هیئت آزمون‌های غیرمخرب هوانوردی:

- یک نهاد هوافضای مستقل ملی است که نمایندگی صنعت هوایی کشور را بر عهده دارد<sup>۴</sup>.
- توسط سازمان‌های نظارتی هر کشور به رسمیت شناخته می‌شود<sup>۵</sup>.
- فراهم‌سازی یا پشتیبانی احراز شرایط کارکنان NDT و یا خدمات ارزیابی (مطابق استاندارد EN 4172) را بر عهده دارد<sup>۱</sup>.

<sup>۱</sup> Members of the Forum shall be recognized by the relevant national Civil Aviation Authority and, where such agencies are active in their country, shall have in place an audit and approval system for 'Outside Agencies' and 'Internal Agencies' (Qualifying Agencies) providing NDT training and/or qualification examinations for personnel in accordance with the requirements of EN 4179.

<sup>۲</sup> Advisory Body

<sup>۳</sup> An independent national aerospace organization representing a nation's aerospace industry that is chartered by the participating prime contractors and recognized by the nation's regulatory agencies to provide or support NDT qualification, examination, and/or certification services in accordance with this standard (Paragraph 3.18)

<sup>۴</sup> An independent national aerospace organization, representing a nation's aerospace industry that is chartered by the participating prime contractors

<sup>۵</sup> And recognized by the nation's regulatory agencies

- مطابق فرایند های اداری و دستورالعمل های کاری اداره می شود (دارای اساسنامه، نهاد تصمیم گیری)<sup>۲</sup>
- کشورهای بدون هیئت مذکور ممکن است از خدمات هیئت های دیگر استفاده کنند و الزامی در تشکیل آن نیست مگر مطابق الزامات داخلی<sup>۳</sup>

اعضای دارای رای در این نهاد تصمیم گیر افراد سطح ۳ متشکل از prime contractors یا Type Certificate Holders هستند و بقیه اعضا در فرایند رای گیری همکاری می نمایند و یا حق رای ندارند ولی هیئت را پشتیبانی می نمایند.<sup>۴</sup>

هیئت ملی آزمون های غیرمخرب هوانوردی ایران: در سازمان هواپیمایی کشوری جمهوری اسلامی ایران نیز نخستین بار، دستورالعمل "شرایط صدور و گواهینامه های بازرسی های غیرمخرب" توسط متخصصین صنعت هوایی کشور در سال ۱۳۷۷ تدوین و انتشار یافت و بعدها به عنوان CAD 4701 شناخته شد. این دستورالعمل گرچه مدعی بود که برگرفته از آئین نامه SNT-TC-1A انجمن آزمون های غیرمخرب امریکا است اما هیچ یک از الزامات آن را در نظر نگرفته بود و از نظام اثبات صلاحیت شخص ثالث تبعیت می کرد. متخصصان آزمون های غیرمخرب پس از تکمیل مدارک توسط اداره کل گواهینامه ها و آزمایشات پزشکی مورد ارزیابی قرار می گرفتند و در صورت کسب صلاحیت لازم گواهینامه دریافت می کردند. گرچه در آن زمان تدوین این دستورالعمل حرکت مثبتی به شمار می رفت اما به لحاظ فنی اشکالاتی داشت، لذا این دستورالعمل در سال ۱۳۸۳ و به درخواست سازمان هواپیمایی کشوری مجدداً ویرایش شد و این بار مطابق الزامات SNT-TC-1A و ANSI/ASNT CP-189 آئین نامه جدیدی تدوین شد، اما همانند گذشته "اداره کل گواهینامه و آزمایشات پزشکی" مرجع صدور گواهینامه بود. هم اکنون بسیاری از متخصصان صنعت هوایی کشور مطابق با الزامات این دستورالعمل گواهینامه دریافت نموده اند. در سال ۱۳۸۷ مجدداً با تشکیل کمیته ای متشکل از متخصصان صنعت هوایی کشور تصمیم به جایگزینی آن با دستورالعملی بر اساس EN 4179 گرفته شد و متعاقب آن دستورالعمل مذکور در زیر بخش Part 66 منتشر گردید. در این دستورالعمل، کارفرما مسئول آموزش و صدور گواهینامه سطح ۱ و ۲ بود و تنها گواهینامه سطح ۳ توسط سازمان هواپیمایی کشوری صادر می گردید. برای این منظور لازم بود تا سازمان هواپیمایی کشوری از هیئتی ملی تحت عنوان هیئت ملی آزمون های غیرمخرب هوانوردی استفاده نماید. از زمان تدوین آئین نامه جدید تشکیل هیئت ملی آزمون های غیرمخرب، به جهت مشکلات زیرساختاری با مشکلاتی مواجه گردید و به دلیل نیاز به اصلاحات و تصویب نهایی اساسنامه / آئین نامه، تاکنون این هیئت استقرار نیافته است.

در همین راستا، در سال گذشته معاونت محترم استاندارد پرواز سازمان هواپیمایی کشوری اقدام به تشکیل کارگروهی جهت تشکیل هیئت ملی آزمون های غیرمخرب صنعت هوایی نمود و با الگوبرداری صحیح از دیگر کشورها، تلاش نمود از تمامی ظرفیت های داخلی از جمله انجمن بازرسی غیرمخرب ایران که بالاترین مرجع علمی و تخصصی در حوزه آزمون های غیرمخرب در کشور است استفاده شود. در جلساتی که با حضور متخصصان صنعت هوایی برگزار گردید، ساماندهی و تشکیل هیئت ملی آزمون های غیرمخرب هوانوردی و اساسنامه پیشنهادی مورد بررسی و تصویب نمایندگان حاضر در مجمع عمومی رسید و فرایند تشکیل هیئت ملی تدوین گردید. در این جلسات همچنین بسترسازی و آشناسازی کلیه سازمان ها، شرکت ها و اشخاص مرتبط با هیئت مطابق اساسنامه مورد توجه قرار گرفت. در قدم بعدی، مصوب گردید که اولین مجمع عمومی نمایندگان شرکت های هوایی و مراکز تعمیراتی جهت انتخابات هیئت ملی آزمون های غیرمخرب تشکیل شود. با بسترسازی جدید هرچند امید زیادی به تشکیل هیئت در آینده نزدیک وجود دارد اما فعلاً سازمان هواپیمایی کشوری به شرکت های هوایی پیشنهاد استفاده از هیئت ملی آزمون های غیرمخرب اروپا را ارائه نموده است.

<sup>۱</sup> To provide or support NDT qualification and/or examination services in accordance with Clause 4.4.2 of the standard

<sup>۲</sup> EN-4172, Clause 4.4.2 states ... The organization has a constitution, a deciding entity, and governed according to administrative and working procedures

<sup>۳</sup> For countries where no NANDTB exists, the services of other NANDTB's may be used, but are not required to do so, unless specified by local or regulatory requirements"

<sup>۴</sup> The voting members in the deciding entity are NDT Level 3 personnel and are from participating prime contractors or type certificate holders as a minimum. Other members may be co-opted as voting or non-voting members as necessary to support the NANDTB

همانگونه که قبلا اشاره شد اگرچه تشکیل این هیئت ملی مطابق با استانداردهای موجود الزامی نیست، اما با توجه به شرایط موجود در کشور تشکیل چنین نهادی به نظر بسیار ضروری می‌نماید. هم‌اکنون کاستی‌های متعددی در این حوزه وجود دارد که در صورت عدم پاسخگویی صحیح می‌تواند عواقب نامطلوبی در پی داشته باشد. از جمله این موارد می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. اهمیت و نقش کارشناسان سطح ۳ و عدم آشنایی کافی شرکت‌های هوایی با مقوله اثبات صلاحیت کارکنان آزمون‌های غیرمخرب.
۲. عدم توجه صحیح کارشناسان سطح ۳ در خصوص مسئولیت‌ها و اختیارات کارشناس سطح ۳ مسئول مطابق با الزامات استاندارد EN 4179.
۳. فقدان مراکز آموزشی واجد صلاحیت برای ارائه خدمات آموزشی صحیح در سطح کشور.
۴. بالا بودن هزینه خدمات آموزشی خارج از کشور.
۵. عدم نظارت صحیح برای مراکز آموزشی آزمون‌های غیرمخرب در سطح کشور.
۶. دشواری در دسترسی به تجهیزات بازرسی مورد نیاز.
۷. دشواری در کالیبراسیون تجهیزات بازرسی مورد نیاز.
۸. پیری ناوگان هواپیمایی کشور و بالا بودن حجم آزمون‌های غیرمخرب در آن‌ها.
۹. آغاز بکارگیری مجدد تحریم‌های شدید آمریکا در حوزه شرکت‌های هوایی ایرانی در اردیبهشت ماه جاری.

بدین ترتیب بنظر می‌رسد ایجاد یک کارگروه ملی برای ارتقاء سطح دانش و آگاهی متخصصان صنعت هوایی و همچنین هم‌اندیشی برای رفع کاستی‌های فوق می‌تواند دلایل موجهی برای تشکیل چنین نهادی باشد. به هر حال امید است با درخواست و پیگیری متخصصان این صنعت و همچنین شرکت‌های هوایی، این هیئت در ایران تشکیل شده و منشاء قابل قبولی برای ارائه خدمات به صنعت هوایی کشور باشد.

#### منابع:

1. EN 4179 as revised Aerospace Series – Qualification and Approval of NDT Personnel
2. NAS 410 as revised NAS Certification & Qualification of Non-destructive Test Personnel
3. EASA AMC 145.A.30 (f) [NDT] Personnel Requirements – Acceptable Means of Compliance
4. Part 66: Aircraft Maintenance Licensing
5. Part 145: Maintenance Organisations

## تعیین عیوب زیر سطحی روی قطعات فلزی در آزمون‌های غیرمخرب با روش برش‌نگاری لیزری به کمک بارگذاری حرارتی

علی چهرقانی<sup>۱\*</sup>، عاطفه فتوت اسکندری<sup>۱</sup>، مهدی حلاجان<sup>۱</sup>، محمد جواد ترکمنی<sup>۱</sup>، سید حسن نبوی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران

\* a\_chehrghani@yahoo.com

### چکیده

امروزه از برش‌نگاری<sup>۱</sup> لیزری به عنوان یکی از روش‌های موثر اپتیکی با قابلیت بالا در شناسایی عیوب زیر سطحی برای مقاصد آزمون‌های غیرمخرب استفاده می‌شود. در این مقاله، روش تجربی تعیین عیوب زیر سطحی روی قطعات فلزی با روش برش‌نگاری لیزری و به کمک بارگذاری حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، در مرحله اول نمونه‌هایی از جنس آلومینیوم و به ضخامت ۳mm و ۵mm در چیدمان برش‌نگاری لیزری، تحت تابش لیزر دیودی قرار گرفته و ارزیابی شده است. عیوب زیر سطحی به صورت حفره‌هایی با قطر و عمق مختلف در پشت نمونه‌ی تحت ارزیابی ایجاد شده‌اند. پس از برپایی چیدمان مناسب، تاثیر جهت و میزان برش اعمال شده و همچنین مقدار بارگذاری حرارتی بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، در تعیین عیوب زیر سطحی نسبت قطر به عمق عیوب از اهمیت بالایی برخوردار است. در نمونه‌های ارزیابی شده، کمینه قطر عیوب قابل شناسایی در حدود ۲/۵ برابر عمق می‌باشد. عیوب زیرسطحی معمولاً به صورت یک شکل نسبتاً متقارن در تصاویر فاز مشاهده می‌شود.

در برش‌نگاری آنچه دوربین به ما نشان می‌دهد شدت است و از آنجایی که تنش، کرنش و اطلاعات مورد نیاز جسم با تعیین فاز بدست می‌آید هدف نهایی بدست آوردن فاز از روی شدت خواهد بود. در ادامه تکمیل پروژه‌ی آزمون غیرمخرب به روش برش‌نگاری لیزری، به منظور بهبود کیفیت تصاویر و همچنین تعیین فاز و در نتیجه بدست آوردن سائز خرابی در نمونه مورد بررسی از فاز شیف‌تینگ با روش پنج مرحله ای  $\pi/2$  استفاده شد. سپس تصاویر بدست آمده فیلتر و در نهایت فرآیند unwrapping روی آن‌ها اعمال گردید. برش‌نگاری روی نمونه ای از جنس پلکسی با ضخامت ۶ mm دارای عیوب دایروی و عیوبی به شکل ترک با ابعاد مختلف در پشت آن اعمال شد.

**واژگان کلیدی:** روش‌های اپتیکی، برش‌نگاری لیزری، عیوب زیر سطحی، بارگذاری حرارتی

### ۱- مقدمه

انواع عیوب با اندازه‌های مختلف ممکن است در یک قطعه ایجاد شود که ماهیت و اندازه آن‌ها، بر کارکرد آتی قطعه تأثیر گذار است. عیوب دیگری مانند ترک‌های ناشی از خستگی و خوردگی در حین کارکرد قطعه نیز ممکن است بوجود آید. تشخیص و ارزیابی اندازه، شکل و موقعیت این عیوب در کنترل عملکرد صحیح قطعات اهمیت بسیار زیادی دارد. امروزه برای بررسی کیفی تولیدات و همچنین به عنوان بخشی از برنامه‌های بازرسی در تعمیرات عادی قطعات در حین کار از آزمون‌های غیرمخرب استفاده می‌شود. آزمون‌های غیرمخرب به انواع روش‌هایی گفته می‌شود که با بهره‌گیری از آن‌ها می‌توان علاوه بر تشخیص بعضی از خواص فیزیکی و شیمیایی،

ناپیوستگی‌ها، تغییرات ساختاری درون قطعات و ادوات را بدون نمونه برداری و تخریب، شناسایی و ارزیابی نمود [۱-۴]. روش‌های گوناگونی برای انجام آزمون‌های غیرمخرب وجود دارد. در بین روش‌های مختلف، آزمون‌های غیرمخرب لیزری به دلیل انجام بازرسی‌ها، اندازه‌گیری‌ها و کنترل فرآیندها به صورت غیرتماسی و همچنین حصول نتایج با سرعت و دقت بالا و هزینه پایین جایگاه ویژه‌ای کسب نموده‌اند [۵-۷]. با کمک تکنیک برش‌نگاری لیزری می‌توان تصاویری سه بعدی از اجسام تحت آزمون ایجاد کرد که در آنها محل وجود عیوب ساختاری قابل رویت است [۸، ۹]. برای نمونه، نلسون و همکارانش در تحقیقی روش برش‌نگاری لیزری را برای تعیین تنش‌های پسماند در قطعات مختلف بکار برده‌اند [۱۰]. علاوه بر تعیین تنش

شدت پرتوهای ورودی به دوربین قبل و بعد از اعمال بارگذاری (IA و IB) برابرند با

$$I_A = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos \varphi \quad (1)$$

$$I_B = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos(\varphi + \Delta\varphi) \quad (2)$$

I<sub>1</sub> و I<sub>2</sub> شدت پرتوهای بازتابیده شده از آینه ها هستند.  $\varphi$  فاز لکه ها و  $\Delta\varphi$  تغییر فاز بعد از اعمال بارگذاری است. در نهایت شدت تصویری که از کم کردن شدت قبل و بعد از اعمال بارگذاری در سیستم کامپیوتر مشاهده می شود برابر است با

$$I = I_B - I_A = 2\sqrt{I_1 I_2} [\cos(\varphi) - \cos(\varphi + \Delta\varphi)] \quad (3)$$

اختلاف فاز اپتیکی بدست آمده برابر است با

$$\frac{\Delta\phi(x,y) - \Delta\phi(x+\Delta x,y)}{2} = \frac{\delta L(x,y)}{\delta x} \cdot \frac{\pi \Delta x}{\lambda} (Kx, y) \quad (4)$$

با فرض اینکه راستای تابش به سطح نمونه (K<sub>1</sub>) و بازتابش (K<sub>2</sub>) یکی باشد  $\frac{\delta L_x}{\delta x}$  و  $\frac{\delta L_y}{\delta x}$  تقریباً برابر صفر می شود و خواهیم داشت:

$$\Omega = \frac{4\pi}{\lambda \cos\theta} \frac{\delta L_z}{\delta s} \Delta S \quad (5)$$

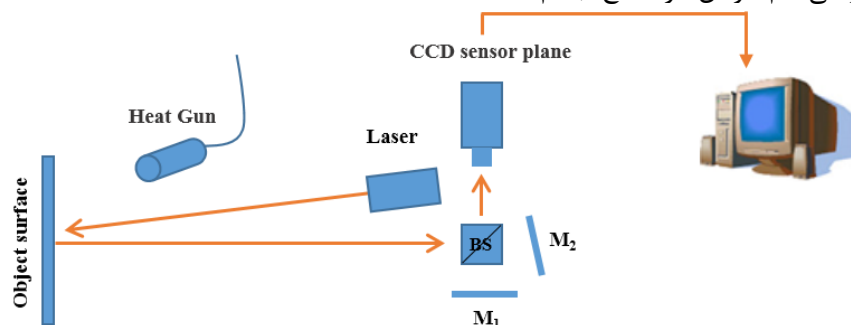
به منظور استفاده از آزمون برش‌نگاری لیزری در تعیین عیوب زیرسطحی در مرحله‌ی اول نمونه‌هایی از جنس آلومینیوم در دو ضخامت ۳mm و ۵mm آماده و در سطح پشت آنها عیوبی به صورت حفره‌هایی با عمق و قطرهای مختلف مطابق جدول ۱ ایجاد شد. این نمونه‌ها تحت تابش یک لیزر دیودی ۶۶۰nm قرار گرفته و بارگذاری توسط یک تفنگ حرارتی انجام شد. نتایج توسط دوربین CCD ضبط شده و بعد از پردازش تصویر توسط نرم افزار، تصویر نهایی بدست آمد.

و عیوب قطعات، در تحقیقاتی دیگر با تغییر چیدمان، از این روش برای مشاهده شکل سطوح مختلف استفاده شده است [۱۱]. همچنین، در حال حاضر از برش‌نگاری دیجیتالی به طور گسترده در صنعت لاستیک سازی استفاده می‌شود [۱۲].

در این پژوهش، روش تجربی تعیین عیوب زیر سطحی روی قطعات فلزی با روش برش‌نگاری لیزری و به کمک بارگذاری حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، نمونه‌هایی از جنس آلومینیوم در دو ضخامت ۳mm و ۵mm تحت تابش لیزر دیودی قرار گرفته و ارزیابی شده است. عیوب زیر سطحی به صورت حفره‌هایی با قطر و عمق مختلف در پشت نمونه ایجاد شده‌اند. سپس تاثیر مقدار بارگذاری حرارتی بر نتایج حاصل از برش‌نگاری و همچنین میزان حساسیت این روش بررسی شده است. سپس آزمون برش‌نگاری لیزری با اعمال فازشیفتینگ و فرآیند پردازش تصویر انجام شده و سائز عیب بدست آمده از این آزمون تعیین شد.

## ۲- چیدمان آزمایش

تصویر شماتیک چیدمان استفاده شده برای سیستم برش‌نگاری در این تحقیق در شکل (۱) نشان داده شده است. برای اعمال برش‌نگاری، ابتدا چیدمان آزمایش با رویکرد تداخل سنجی مایکلسون در آزمایشگاه برپا شد. این روش بر پایه تداخل دوجبهه نور لیزر بازتاب شده از سطح جسم قبل و بعد از اعمال بارگذاری و بررسی فریزهای تداخلی برای تشخیص محل عیب است. تصویر حاصل یک تصویر لکه دار است که با کم کردن شدت نور ذخیره شده قبل و بعد از اعمال بارگذاری، برهم نهی و پردازش تصویر یک تصویر هاله دار از سطح ایجاد می‌شود که نشان دهنده نواحی هم کرنش در سطح جسم است.



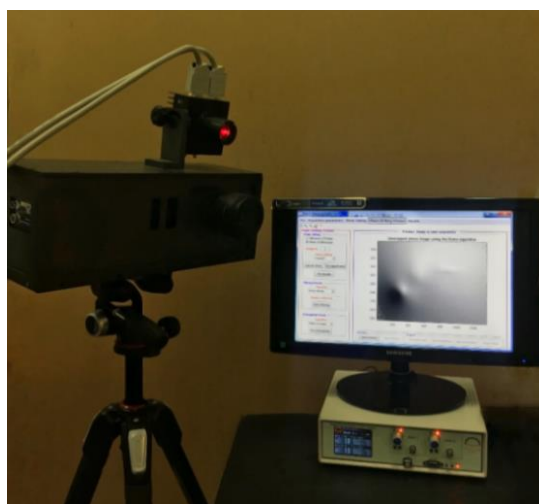
شکل (۱). تصویر شماتیک چیدمان سیستم برش‌نگاری لیزری استفاده شده برای تعیین عیوب زیر سطحی نمونه‌هایی با جنس‌های مختلف

عیوبی به شکل ترک با ابعاد مختلف در پشت آن اعمال شد.

### ۳- نتایج و بحث

برای اعمال آزمون برش‌نگاری، ابتدا نمونه در فیکسچر مناسب قرار گرفته و سپس بارگذاری حرارتی توسط یک تفنگ حرارتی روی نمونه انجام شد. هرکدام از نمونه‌ها به مدت ۷s تحت تابش قرار گرفت. با استفاده از تفاضل تصاویر شدت قبل و بعد از بارگذاری و پردازش تصویر نهایی، شکلی حاوی فریزهای تداخلی حاصل می‌شود. تصویر نهایی با استفاده از نرم افزار مناسب پردازش شده و نویزهای مختلف آن فیلتر شده است. نتایج برای نمونه با ضخامت ۳mm در شکل (۳) نشان داده شده است.

شکل (۲) دستگاه طراحی شده را نشان می‌دهد. در این پژوهش تاثیر میزان عمق و قطر عیوب در نتیجه‌ی حاصل از برش‌نگاری و همچنین اهمیت نسبت عمق به قطر در ظاهر شدن عیب نمونه با استفاده از این روش مورد بررسی قرار گرفت. سپس برای بهبود کیفیت تصاویر و همچنین بدست آوردن سایز عیوب موجود در نمونه از فازشیفتنگ به روش پنج مرحله ای  $\pi/2$  در فرآیند آزمون برش‌نگاری استفاده شد. بدین منظور یکی از آینه‌ها به یک پیزوالکتریک متصل شده و با استفاده از درایور مناسب برای بازه جابجایی فاز صفر تا  $2\pi$ ، پنج گام ولتاژ به آینه اعمال شد. برای بدست آوردن ولتاژ مناسب برای جابجایی  $2\pi$  از روش فریز شماری استفاده شد. در نهایت وری تصاویر بدست آمده فیلترینگ اعمال شده و سپس نتایج Unwrapp شدند. برش‌نگاری روی نمونه ای از جنس پلکسی با ضخامت ۶ mm دارای عیوب دایروی و



شکل (۲). دستگاه برش‌نگاری لیزری ساخته شده در این پژوهش

جدول ۱. مشخصات نمونه‌ها و عیوب موجود در آنها برای اعمال برش‌نگاری لیزری

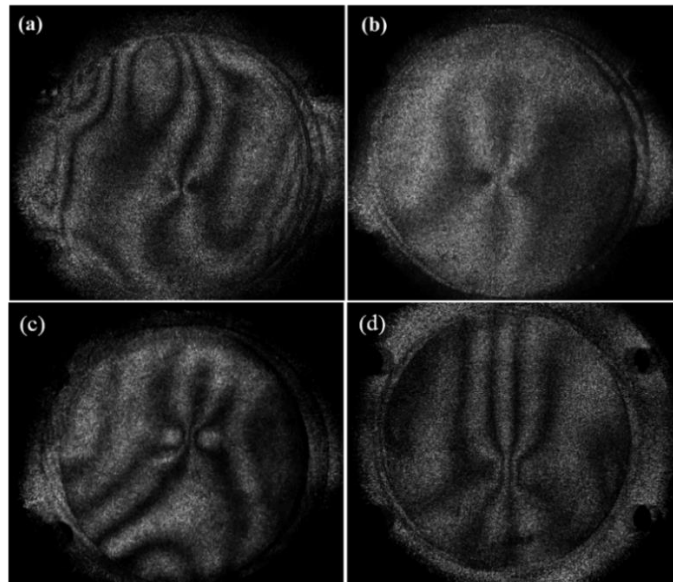
ورقه‌ی آلومینیوم به ضخامت ۳mm	عمق حفره (mm)	۲				
	قطر حفره (mm)	۳	۴	۵	۶	۱۰
ورقه‌ی آلومینیوم به ضخامت ۵mm	عمق حفره (mm)	۴-۳-۲				
	قطر حفره (mm)	۴	۵	۱۰	۱۵	

بررسی شدند. نتایج حاصل در شکل (۵) نشان داده شده است.

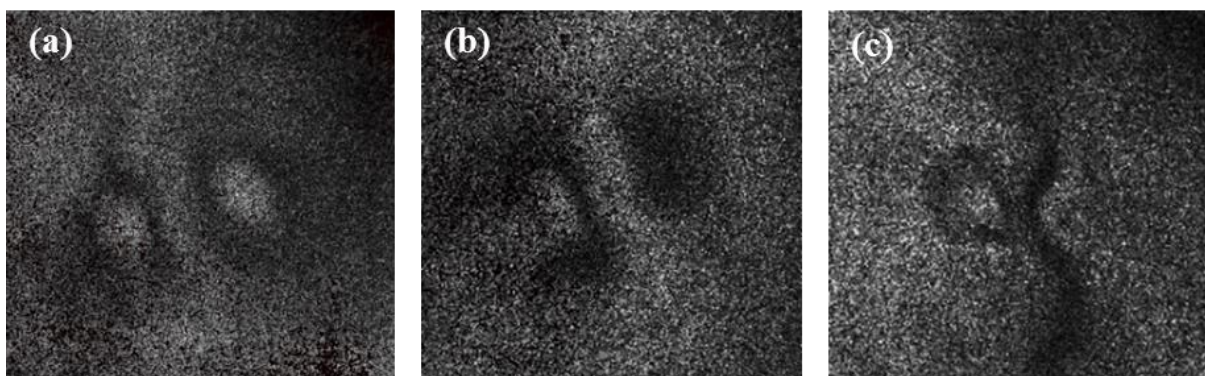
برای عیوب با عمق‌های ۲ و ۳ میلی‌متر بعد از بررسی نتایج بدست آمده از تصاویر برش‌نگاری، عیوب با قطر ۴mm قابل تشخیص نبودند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با کاهش عمق عیوب و همچنین با کم شدن مقدار قطر، قابلیت تصویر برای تشخیص عیب به سرعت کاهش می‌یابد. ارتباط بین قطر حفره و حداقل عمق قابل مشاهده باعث می‌شود تا تنها برخی عیوب قابل شناسایی باشند [۱۳]. کمترین مقدار بدست آمده برای نسبت قطر به عمق در این پژوهش برابر با ۲/۵ است. نتایج نشان می‌دهد، هر چه عمق عیب ایجاد شده کم باشد یا به عبارت دیگر فاصله آن از سطح ارزیابی شده بیشتر باشد تاثیر حرارت ایجاد شده توسط تفنگ حرارتی روی بهم ریختگی

همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است، محل عیوب از طریق به هم ریختگی فریزهای تداخلی مشخص می‌شود. همچنین اندازه تصاویر بدست آمده نیز تا حدودی با ابعاد عیوب متناسب است به طوری که عیوب بزرگتر سبب ایجاد تصاویری با ابعاد بزرگتر شده است. در مرحله بعد، آزمایش برای نمونه‌ی آلومینیوم با ضخامت ۵mm انجام شد. نتایج برای عیوب با قطر ۱۵mm و عمق‌های متفاوت در شکل (۴) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، برای هر سه عیب با عمق مختلف محل خرابی کاملاً در الگوی هاله‌ای مشخص است. قابل ذکر است که اندازه‌ی بهم ریختگی ناشی از عیوب بسیار نزدیک با اندازه واقعی عیب است. برای یافتن کوچکترین عیب قابل شناسایی، با توجه به شرایط آزمایش، قطرهای ۱۰، ۵ و ۴ میلی‌متر نیز



شکل (۳). الگوی فریزهای تشکیل شده حاصل از برش‌نگاری لیزری برای ورقه آلومینیوم به ضخامت ۳mm حاوی عیوب مختلف با عمق ۲mm و قطرهای مختلف (a) ۳mm (b) ۴mm (c) ۵mm (d) ۶mm



شکل (۴). تصاویر حاصل از آزمون غیرمخرب ورقه‌ی آلومینیوم به ضخامت ۵mm و حاوی عیوب دایروی به قطر ۱۵mm و عمق‌های مختلف (a) عمق ۲mm (b) عمق ۳mm (c) عمق ۴mm

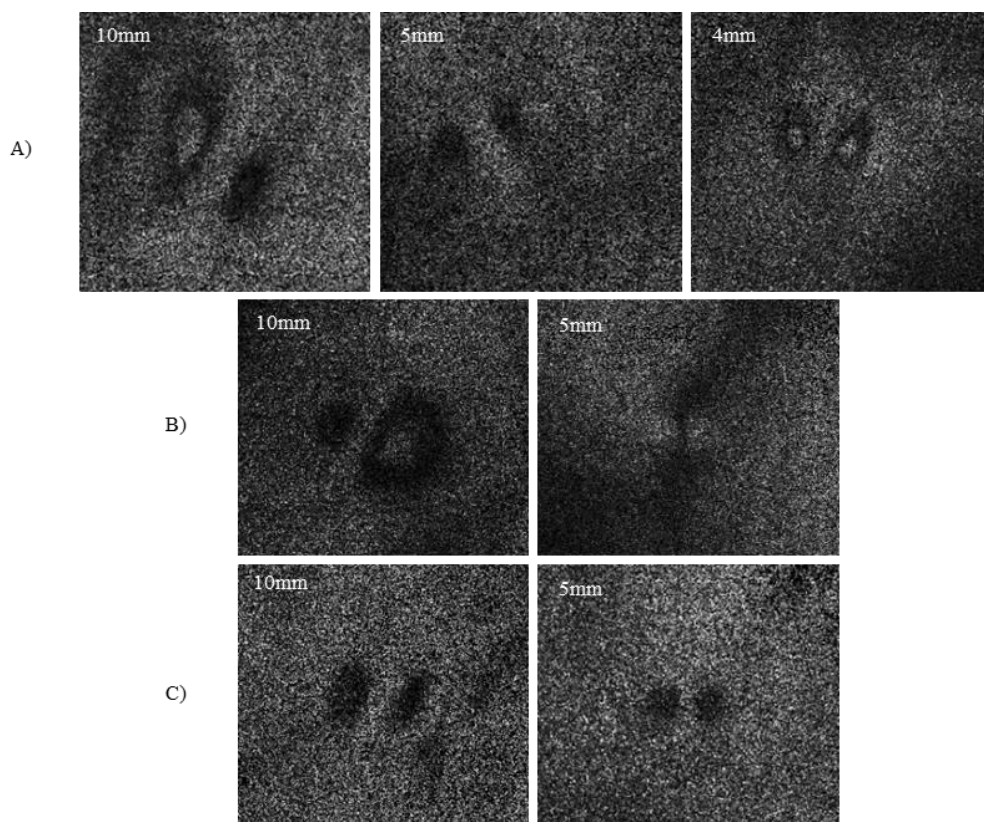
واقعی عیب، ترکی به عرض  $0/5$  میلی‌متر و طول  $2$  سانتی-متر و حفره ای به قطر  $12$  میلی‌متر است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش ورقه‌های آلومینیوم با دو ضخامت  $3$  و  $5$  میلی‌متر دارای عیوبی به شکل حفره با عمق و قطرهای متفاوت توسط آزمون برش‌نگاری لیزر به منظور یافتن عیوب مورد آزمایش قرار گرفتند و تاثیر میزان عمق و قطر عیوب در نتایج بدست آمده و هم چنین اثر ضخامت نمونه بررسی شد. از یک تفنگ حرارتی برای بارگذاری نمونه استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان داد که آنچه در بدست آوردن نتیجه مطلوب و ظاهر شدن عیب نمونه بسیار تاثیرگذار است نسبت اندازه قطر به عمق حفره‌ی ایجاد شده در پشت نمونه است. تا جایی که اگر این نسبت از یک مقدار کمتر باشد. مشاهده‌ی عیوب در نمونه بسیار سخت می‌شود. این مقدار در این پژوهش برای هر دو ضخامت مورد آزمایش تقریباً یکسان و برابر  $2.5$  بود.

فریزها کاهش می‌یابد. در نتیجه، به دلیل دانه‌ای بودن تصاویر حاصل از برش‌نگاری قابلیت تشخیص عیب روی تصویر توسط اپراتور کم می‌شود. در قطرهای بسیار کوچک نیز در صورت کم بودن عمق عیب از یک مقدار خاص، همین اتفاق تکرار می‌شود. بررسی نتایج مربوط به نمونه با ضخامت  $3$ mm و  $5$ mm نشان می‌دهد که کمینه مقدار نسبت قطر به عمق در هر دو نمونه تقریباً یکسان است.

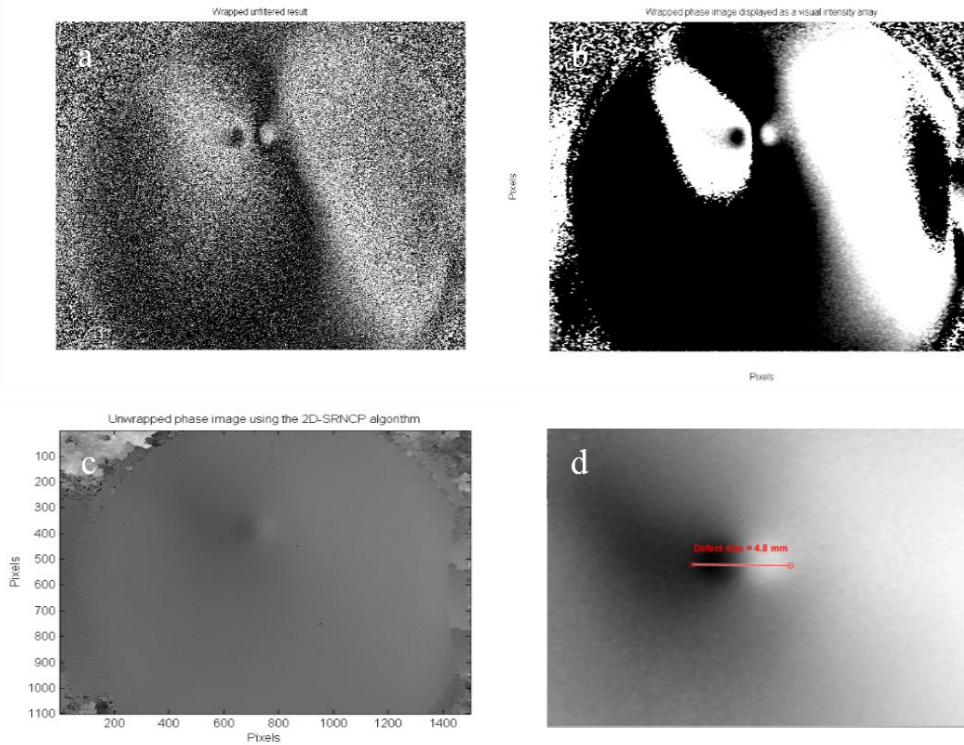
با استفاده از فازشیفتینگ در روند آزمون، نتایج بدست آمده از کیفیت بسیار بالاتری برخوردار بودند. و سایز عیوب با دقت بسیار بالایی تخمین زده شد. شکل (۶) آزمون برش‌نگاری لیزری روی ورقه‌ی پلکسی با ضخامت  $6$ mm را نشان می‌دهد. اندازه واقعی عیب برابر با  $5$ mm و اندازه تخمین زده شده  $4/8$ mm بود. با اضافه کردن مراحل فازشیفتینگ، فیلترینگ و Unwrapping به سیستم طراحی شده دستگاه قابلیت تشخیص همزمان عیوب در اندازه‌ها و اشکال مختلف را با کیفیت و دقت بسیار بالا بدست آورد. شکل (۷) نتیجه بررسی ورقه ای از جنس پلکسی با ضخامت  $6$ mm را نشان می‌دهد. اندازه



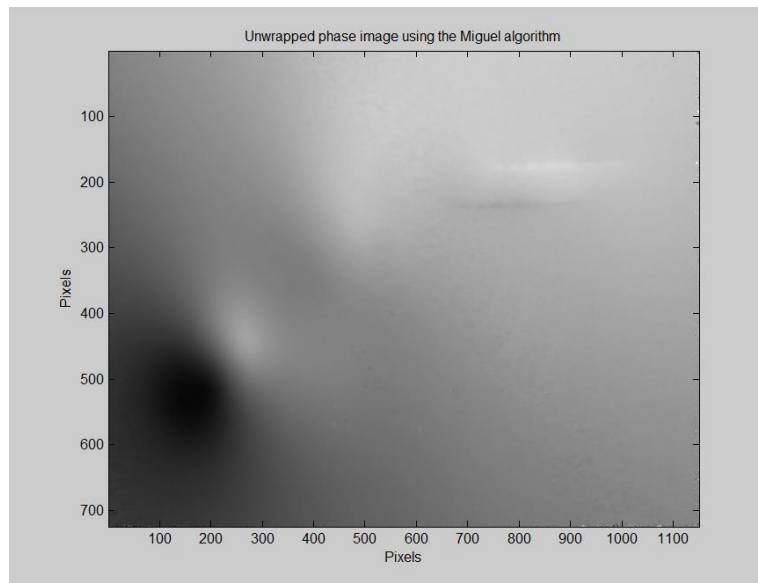
شکل (۵). نتایج آزمون برش‌نگاری لیزری برای ورقه آلومینیوم به ضخامت  $5$ mm (A) برای حفره ای به عمق  $4$ mm (B) برای حفره ای به عمق  $3$ mm (C) برای حفره ای به عمق  $2$ mm

اندازه‌گیری کرد. هم‌چنین مزیت قابل توجه این دستگاه توانایی بالا در بررسی عیوب در انواع جنس‌ها به خصوص جنس‌های کامپوزیتی است که کاربرد بسیار بالایی در صنعت حمل و نقل و صنعت هواپیمایی دارند.

هم‌چنین با استفاده از دستگاه برش‌نگاری لیزری ساخته شده در این پروژه و با استفاده از فازشیفتینگ و در ادامه فرآیند پردازش تصویر می‌توان عیوب زیرسطحی مختلف در اشکال و اندازه‌های مختلف را شناسایی و با دقت بالایی



شکل (۶). نتایج حاصل از برش‌نگاری لیزری. (a) تصویر بهم ریختگی فریز در محل وجود حفره‌ای به قطر  $5\text{ mm}$  در نمونه‌ی پلکسی با استفاده از فازشیفتینگ. (b) نتیجه حاصل از اعمال فیلترینگ. (c) تصویر بدست آمده از unwrapping. (d) تعیین سایز خرابی موجود در نمونه. اندازه‌ی عیب تعیین شده با استفاده از برش‌نگاری لیزری  $4/8\text{ mm}$  تخمین زده شد.



شکل ۷. تعیین عیوب زیرسطحی ورقه‌ی پلکسی شامل حفره‌ی  $12\text{ mm}$  و ترکی به عرض  $0/5$  میلی‌متر و طول  $2$  سانتی‌متر

8. Newman J.W., 2008, "Aerospace NDT with advanced laser shearography", Proceedings of the seventeenth world conference on nondestructive testing, Shanghai, China, 25-8.
9. Groves, R.M., James, S.W., Tatam, R.P., 2001, "Full surface strain measurement using shearography", Proc. SPIE 4448, 142-52.
10. Nelson, D.V., "Residual Stress Determination by Hole Drilling Combined with Optical Methods", Exp. Mech. 50, 145-58, 2010.
11. Groves, R.M., James, S.W., Tatam, R.P., 2004, "Shape and slope measurement by source displacement in shearography", Opt. Lasers Eng., 41, 621-34.
12. Zastavnik, F., Pyl, L., Gu, J., Sol, H., Kersemans, M., Van Paeppegem, W., 2014, "Comparison of shearography to scanning laser vibrometry as methods for local stiffness identification of beams strain", 50, 82-94.
13. Liu, Z., Gao, J., Xie, H., Wallace, Ph., 2011, "NDT capability of digital shearography for different materials", Optics and Lasers in Engineering, 49, 1462-1469.

## ۴- مراجع

1. Xie, H.M., Kishimoto, S., Asundi. A., 2000, "In-plane deformation measurement using the atomic force microscope moire method", Nanotechnology, 11(1), 24-9.
2. Allgaier, M., Ness, S., McIntire, P., Moore, P., 1993, "Nondestructive testing handbook: Visual and optical testing", ASNT, vol. 8.
3. Hung, Y.Y., 1982, "Shearography: a new optical method for strain measurement and non-destructive testing", Opt. Eng., 21, 391-5.
4. Steinchen, W., Yang, L., 2003, "Digital Shearography - Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry", SPIE Press, Bellingham, Washington, USA.
5. He, Y.M., Tay, C.J., Shang, H.M., 1999, "Digital phase-shifting shearography for slope measurement", Opt. Eng., 38, 1586-9.
6. Schuth, M., Vossing, F. Yang, L., 2010, "Shearographic NDT-Measuring Systems in Theory and Application (Endoscope for Nondestructive Test)", 2nd International Symposium on NDT in Aerospace.
7. Francis, D., Tatam, R.P., Groves, R.M., 2010, "Shearography technology and applications: a review", Meas. Sci. Tech., 21, 1-29.

## Inspection of metallic samples defects in nondestructive testing by laser shearography with thermal loading

A. Chehrghani<sup>1\*</sup>, A. Fotovat<sup>1</sup>, M. Halajan<sup>1</sup>, M.J. Torkamany<sup>1</sup>, S.H. Nabavi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Iranian National Center for Laser Science and Technology;

\* a\_chehrghani@yahoo.com

### Abstract

Digital shearography is widely used as a nondestructive inspection method in detection of subsurface defects and strain measurement in experimental mechanics. In addition, full field measurement and low vibration isolation requirements cause to higher application of this method in quality control applications. In this paper, the application of digital shearography in inspection of metallic samples has been studied. The subsurface defects of aluminum samples have been investigated by using a proper setup of digital shearography. The thickness of samples is 3mm and 5mm and the shear size in experiments is equal to 4mm. The samples are irradiated by a 660nm diode laser and recorded shearograms before and after thermal load have been analyzed by means of appropriate software. The results showed that, the diameter to depth ratio of defects employs important role in detectability of subsurface defects. By using this method, the minimum detectable diameter of defect is 2.5 times of its depth.

**Keywords:** optical methods, laser shearography, metallic samples, finite element modeling

## چالش‌های بازرسی دوره‌های کپسول‌های CNG فولادی در کشور و عیوب محتمل در کپسول‌ها

مهدی اسکندرزاده اصل<sup>۱\*</sup>، علی کلاکی<sup>۲</sup>، حامد ملازاده<sup>۳</sup>

۱. دپارتمان مدیریت خوردگی و حفاظت فنی، شرکت بازرسی فنی اس جی اس، تهران، ایران

۲. رئیس خوردگی و حفاظت فنی، شرکت نفت مناطق مرکزی، تهران، ایران

۳. دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشکین شهر، ایران

\* m.eskandarzade@ut.ac.ir

## چکیده

با افزایش قیمت بنزین رغبت به استفاده از ماشین‌های دوگانه سوز در کشور روز به روز افزایش می‌یابد. در ایران برای ذخیره گاز طبیعی در ماشین‌های دوگانه سوز از کپسول‌های CNG فولادی استفاده می‌شود. در حال حاضر میلیون‌ها ماشین سواری در کشور از کپسول‌هایی استفاده می‌کنند که بیش از ۱۰ سال از عمر آن‌ها گذشته است. اخیراً سازمان ملی استاندارد بازرسی دوره‌های کپسول‌های CNG را برای ناوگان تاکسیرانی اجباری نموده است. در دستورالعمل این سازمان آزمون‌های چشمی، در موارد بحرانی آزمون فراصوتی پیش بینی شده است. با توجه به اهمیت موضوع در این مقاله به بررسی وضعیت کپسول‌های CNG کشور پرداخته شده و عیوب محتمل در کپسول‌های CNG مستعمل بررسی شده است. همچنین بازرسی دوره‌های مرسوم برای کپسول‌های CNG در داخل و خارج کشور با هم مقایسه گردیده‌اند. نتایج بیانگر این است که آزمون‌های پیشنهادی سازمان ملی استاندارد برای برآورد الزامات ایمنی کپسول‌ها کافی است. ولی از آنجایی که نزدیک به ۲۵٪ کپسول‌های مورد استفاده در کشور را مخازن غیر استاندارد تشکیل می‌دهند پیشنهاد می‌شود دوره بازرسی از ۳۶ ماه کاهش یابد.

**کلمات کلیدی:** کپسول‌های CNG، بازرسی فنی مخازن تحت فشار، آزمون فراصوتی، آزمون هیدرواستاتیک

## ۱- مقدمه

مخزن ذخیره گاز طبیعی (CNG) استاندارد بایستی به گونه ای طراحی شده باشد که در صورتیکه فشار داخل مخزن بیش از حد بالا برود، به امن ترین صورت ممکن منهدم شود. همچنین مخزنهای استاندارد مجهز به سنسوری هستند که در صورت افزایش دمای مخزن، باعث می شود گاز از مخزن آزاد شود. مطابق گزارش مرکز داده سوختهای جایگزین ایالات متحده، این کشور در حدود ۱۵۰ هزار خودروی گاز سوز دارد [۱] که تعداد آنها از سال ۲۰۰۷ تغییر قابل توجهی نداشته است. بین سالهای ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۱، در حدود ۸ مخزن دچار آسیب خطرناک در این کشور شده اند. که بیانگر آماری در حدود یک خرابی در سال به ازای هر ۵۶ هزار مخزن CNG می باشد. علت اکثر این خرابی ها استفاده نادرست و غیر استاندارد از مخزن بوده است. در ایران نیز در سالهای اخیر گزارشهای متعددی از حوادث مخازن گاز ماشینهای سواری منتشر شده است. بررسی های دانشمندان [۲] نشان می دهد که به دلیل وجود سولفور در گاز طبیعی احتمال بروز ترکهای خوردگی تحت تنش (SCC) در ماده فولادی معمولی وجود دارد ولی در صورتیکه از فولاد

ایران با بیش از چهار میلیون خودروی گاز سوز در ناوگان حمل و نقل خود بیشترین تعداد خودروهای گازسوز دنیا را دارد مخزن ذخیره گاز مورد استفاده در اکثر قریب به اتفاق وسائط نقلیه کشور از نوع تمام فولادی و یا همان مخزن تیپ ۱ می باشد که از نظر هزینه تمام شده ارزان ترین نوع بوده ولی به لحاظ وزن، سنگین تر از سایر انواع (کامپوزیتی، کامپوزیتی-فولادی و...) می باشد. عمر مخزنهای تیپ یک ۲۰ سال پیش بینی شده است که البته مطابق استاندارد های بین المللی بایستی در دوره های پیش بینی شده مورد بازرسی دوره ای قرار گیرند. آسیبهای محتمل در مخازن ذخیره گاز ماشین های سواری بیشتر به خاطر دماهای پایین و بالای زیاد، ترکهای خستگی ناشی از پر و خالی شدنهای زیاد مخازن در حین سرویس دهی روزمره، نوسانات داخل ماشین، قرار گرفتن مخزن در معرض مواد خوردنده و نیز در نتیجه حوادثی مانند آتش سوزی و یا آسیب های مکانیکی در حین بروز تصادفات رانندگی می باشند. یک

گوشتی دیواره مخزن طبق محاسبات سرانگشتی بر مبنای تنش وون-میسز بایستی حدود ۱۷ میلیمتر بشود. علاوه بر مقاومت در مقابل فشار داخلی گاز، کپسول همچنین بایستی در مقابل خستگی تنشی نیز مقاوم باشد و بتواند حداقل ۱۰۰۰ بار پر و خالی شدن تا فشار ۲۰۰ بار را در سال و در دمای ۱۵ درجه سیلیسیوس تحمل نماید. مخزنها طوری طراحی می شوند که دمای مخزن می تواند بین ۴۰- و ۶۵ درجه سیلیسیوس تغییر کند.

برای اینکه کپسولهای مورد استفاده در وسائط نقلیه ویژگیهای مذکور را داشته باشند آزمونهای مختلفی حین ساخت روی آنها صورت می پذیرد. بدین منظور استانداردهای مختلفی برای ساخت مخازن تحت فشار تبیین شده است و در سطح دنیا مورد استفاده قرار می گیرد. در آمریکا ساخت مخازن CNG بایستی مطابق استاندارد ANSI/CSA NGV2 صورت پذیرد. برخی از این آزمونهای اشاره شده در این استانداردها موارد زیر می باشند.

#### ۲-۱- آزمون هیدرواستاتیک

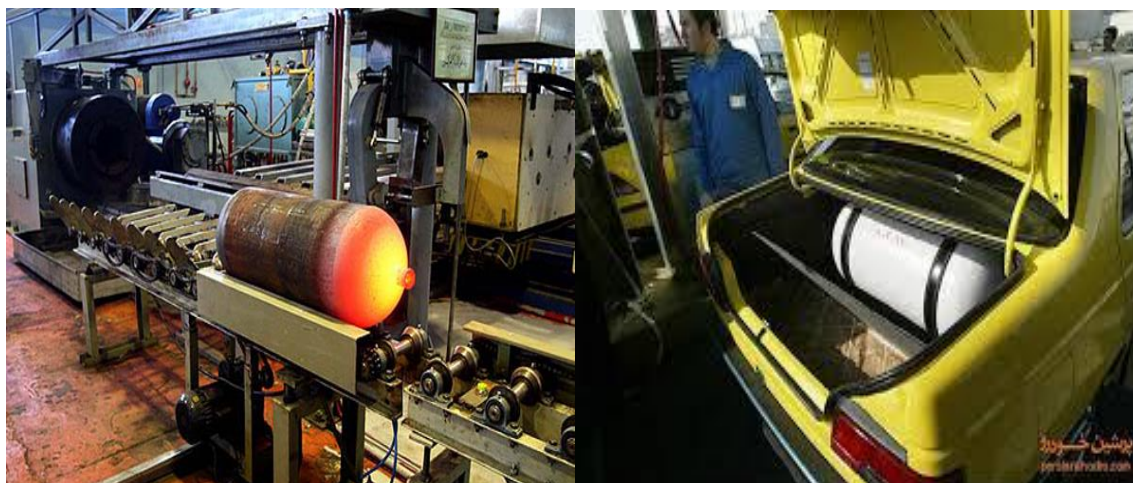
این تست معمولاً با استفاده از سیال آب صورت می پذیرد. در مورد مخازن کامپوزیتی تخریب مخزن در فشار بالا بایستی بصورت نشی (شکل ۲-الف) باشد و انهدام در مخزن رخ ندهد. در مورد مخازن فولادی انهدام مخزن بایستی از امن ترین نقطه مخزن رخ دهد. همچنین مخزن هم تحت آزمون آب معمولی قرار می گیرد و هم تحت آزمون آب نوسانی (فشار متغیر) قرار می گیرد.

نرمالایزه شده استفاده شود این مشکل به مقدار قابل توجهی ترفیع می گردد. البته به هر حال ترکیب شیمیایی خود گاز مورد استفاده بسیار مهم است و تحقیقات نشان داده است که ترکیب شیمیایی گاز در میزان خوردگی و نیز تولید مواد آلاینده نقش بسزایی بازی می کند [۳]. در این مطالعه موضوع آسیبهای محتمل در کپسولهای CNG تیپ ۱ مورد بررسی قرار می گیرد و استانداردهای مورد استفاده در سطح جهان معرفی می گردند.

#### ۲- مخازن CNG تیپ یک، ویژگی ها و استاندارد

##### ساخت

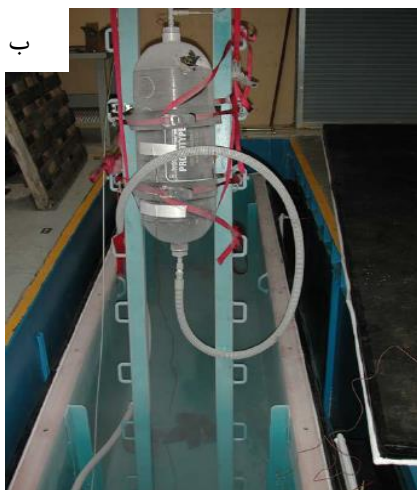
در ایران مخازن CNG به شکل استوانه با استفاده از فولاد و به روش خاصی از آهنگری ساخته می شود شکل (۱). در ساخت این مخازن کارخانجات بایستی از استاندارد ساخت ISO 11439 تبعیت نمایند. این مخزنها ممکن است در ابعاد و نیز ظرفیت های مختلف ساخته شده باشند ولی به هر حال بایستی حداقل مقاومت لازم برای تحمل فشار کاری ۲۰۰ بار را داشته باشند. مطابق کاتولوگ شرکتهای سازنده مخزنهای مورد استفاده در ایران طوری طراحی شده اند که قابلیت تحمل حداقل فشار ۴۵۰ بار را دارند. ولی مطابق استانداردها نباید فشار مخزن در هر شرایطی بالاتر از ۲۶۰ بار بالا برود. ماده مورد استفاده برای ساخت کپسولها معمولاً آلیاژ کروم مولیبدن (34CrMo4) بوده و ضریب اطمینان طراحی ۲/۲۵ در نظر گرفته می شود [۴]. با فرض اینکه شعاع خارجی ۱۸ سانتیمتر باشد، برای تحمل مقدار فشار استاندارد حداقل



شکل (۱): روش ساخت کپسولهای CNG و محل نصب آنها در ماشینهای سواری

### ۳- بازرسی حین کار- تجارب اتفاقات و عیوب مرسوم در مخازن

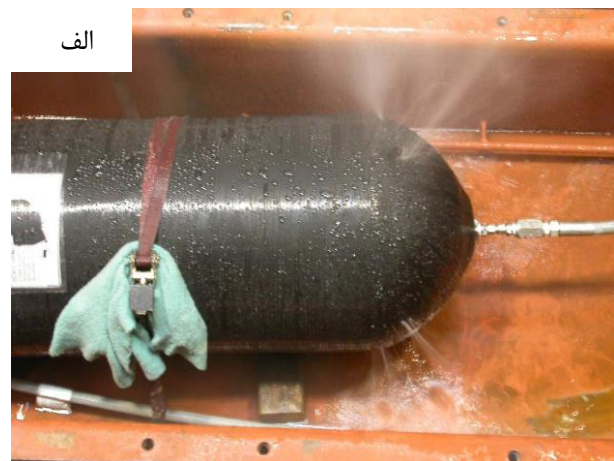
همانطوریکه اشاره گردید ایران بالاترین میزان ماشین های دوگانه سوز را در سطح دنیا دارد و مطابق گفته رئیس انجمن صنفی CNG ایران، نزدیک به ۲۵٪ کپسولهای CNG مورد استفاده در کشور غیر استاندارد بوده و توسط مالکین خودرو در کارگاههای غیر استاندارد نصب گردیده اند. با توجه به گذشت بیش از ۱۰ سال از عمر بیشتر کپسولهای مورد استفاده در وسائط نقلیه کشور در صورت عدم بازرسی صحیح این کپسولها توسط متخصصین مربوطه، با توجه به اینکه اینگونه وسایل نقلیه در داخل شهر و محل های پرتراکم شهری در رفت و آمد هستند بروز فاجعه های انسانی گریز ناپذیر خواهد بود. مثالهایی از اینگونه فجایع در شهرهای مختلف کشور مانند شیراز (۱۳۹۴)، خوراسگان (۱۳۹۴)، ساری (۱۳۸۹)، از این نوع هستند.



ب



ت



الف



پ

شکل (۲): برخی از آزمون‌هایی که در حین تولید مخازن روی آنها صورت می پذیرد.

### ۲-۲- آزمون آب نوسانی در دمای پایین

در این آزمون ابتدا مخزن در دمای پایین ۴۰- درجه سلیسیوس پر می شود و سپس به آرامی دمای مخزن تا ۶۵ بالا برده می شود. و سپس آزمون آب نوسانی روی مخزن صورت می پذیرد. (شکل (۲-ب)).

### ۳-۲- آزمون برخورد

در این آزمون ماده سخت از ارتفاع مناسب با مخزن برخورد می کند تا مقاومت ماده مخزن در مقابل برخورد های احتمالی در آینده بررسی شود (شکل (۲-پ)).

### ۴-۲- آزمون آتش سوزی

در این آزمون مخزن پر از گاز در داخل آتش قرار می گیرد تا میزان مقاومت آنها در مقابل آتش سوزی های احتمالی بررسی شود (شکل (۲-ت)).



شکل (۳): انفجارهای متعدد کپسولهای CNG در شهرهای مختلف کشور



شکل (۴): انفجار مخزن گاز سی.ان.جی خودروی سمند، خوراسگان، ۱۳۹۴  
(علت انفجار: استفاده از مخزن غیر استاندارد)

مخازن بایستی در دوره های حداقل ۳۶ ماهه مورد بازرسی قرار گیرند

#### ۴- عیوب محتمل در کپسولهای CNG

تجربه سالهای گذشته در ایران نشان داده است که حوادث مربوط به کپسولهای CNG در بیشتر موارد مربوط به انواع غیر استاندارد آنها بوده است. شکل (۴) نمونه ای از این نوع حوادث را نشان می دهد. در این مورد خاص که در خوراسگان اصفهان رخ داده است، بجای کپسول استاندارد از کپسول درزدار غیر استاندارد استفاده شده بوده است. با این وجود حتی در کپسولهای استاندارد

خوشبختانه وزارت کشور اخیرا بازرسی دوره ای ماشین های سواری را اجباری نموده است. پس از بازرسی کپسولها بایستی نشان تاییدیه بازرسی بر روی دستگاه نصب شود. مطابق استاندارد ارائه شده توسط سازمان ملی استاندارد کشور به شماره ISIRI 9426 آسیبهای رخ داده در مخازن در سه سطح طبقه بندی می شوند؛ سطح آسیب ۱ به معنی آسیب قابل قبول می باشد و سطح آسیب ۲ از آسیبی حکایت دارد که قابل ترمیم می باشد در حالیکه آسیب سطح ۳ باعث رد شدن مخزن می شود و بایستی مخزن تعویض گردد. مطابق استاندارد تمامی

کپسولها با حساسیت ویژه ای مورد توجه قرار گیرد. در تحقیق حاضر مشخص شد که اکثر قریب به اتفاق حوادث مربوط به مخازن ذخیره سوخت در مخزنهای غیر استاندارد رخ می دهد. همانطوریکه در استاندارد ملی نیز آمده است، بازرسی چشمی توسط بازرس مجرب به تنهایی برای حل بسیاری از مشکلات مربوط به مخازن کافی می باشد و بازرسی های انجام شده از داخل هزاران مخزن ذخیره گاز طبیعی نشان داده است که روغن کمپروسور وجود در گاز طبیعی مانع از بروز خوردگی های داخلی در مخزن می شود [۵]. ولی در مواردیکه بازرس مجرب تشخیص میدهد استفاده از آزمون فراصوتی و یا هیدرواستاتیک می تواند مفید باشد. در حالیکه دوره های ۳۶ ماهه برای بازرسی مخازن ذخیره در استاندارد ملی پیش بینی شده است، با توجه به غیر استاندارد بودن فرآیند ساخت تعداد قابل توجهی از کپسولهای مورد استفاده در کشور پیشنهاد می شود دوره بازرسی این کپسولها کاهش یابد.

هم احتمال بروز عیوب مختلف وجود دارد. یکی از عیوب محتمل در سیستم ذخیره گاز ماشینهای سواری بروز خوردگی در فلز ماده کپسول می باشد. خوردگی موضعی که معمولا بدلیل قرار گرفتن قسمتی از فلز کپسول در معرض ماده خورنده ای مانند مواد اسیدی و یا نمکی رخ می دهد و باعث کاهش ضخامت دیواره کپسول به صورت موضعی می شود، و نیز خوردگی pitting که در قسمتی از ماده فلزی کپسول رخ دهد که کمتر در معرض هوای آزاد قرار دارد، برخی از انواع این عیوب می باشند. از دیگر عیوب محتمل در مخازن می توان به خراش، تورفتگی در نتیجه ضربه و ترک اشاره نمود. شکل (۵) برخی از این عیوب را نشان می دهد.

#### ۵- نتیجه گیری

در مقاله حاضر با توجه به اهمیت موضوع به بررسی وضعیت کپسولهای ذخیره گاز طبیعی مورد استفاده در وسائط نقلیه کشور پرداخته شده است. با توجه به اینکه کشور ما ایران پیشرو ترین کشور در استفاده از ماشین های گاز سوز در جهان می باشد و بیش از ۱۰ سال از عمر این کپسولها می گذرد بایستی موضوع بازرسی این



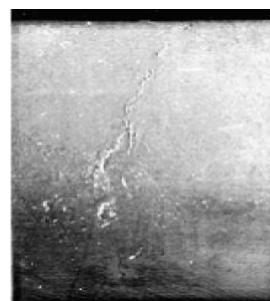
خوردگی pitting مجزا



تورفتگی مخزن



خوردگی عمومی



عیب ترک

شکل (۵): انواع خوردگی های مرسوم در مخازن ذخیره

[3] U.S. Department of Energy Alternative Fuels Data Center  
[http://www.afdc.energy.gov/vehicles/natural\\_gas.html](http://www.afdc.energy.gov/vehicles/natural_gas.html)

[4] مهدی ظهور، سعید صفار، محمد حسن صدقی طهران، طراحی مخازن گاز طبیعی فشرده (CNG) تمام فلزی برای خودروها، کنفرانس ملی مهندسی ساخت و تولید،

[5] ISO 11439:2013 Gas cylinders - High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles.

## ۶- مراجع

[1] Fred F. Lyle, Jr. "Evaluation of the Effects of Natural Gas Contaminants on Corrosion in Compressed Natural Gas Storage Systems-Phase II", Report Prepared by Southwest Research Institute 6220 Culebra Road San Antonio, Texas 78284, 1989.

[2] Hien Ly, "Effects of Natural Gas Composition Variations on the Operation, Performance and Exhaust Emissions of Natural Gas - Powered Vehicles", NGV Conference, 2002.

## Periodic inspection of the CNG vessels; discussion on defects and challenges

Mehdi Eskandarzade<sup>1\*</sup>, Ali Kalaki<sup>2</sup>

Mech. Eng. Group, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.  
 Technical and Corrosion Protection Department, Iranian Central Oil Fields Co., Tehran, Iran.

### Abstract

Considering day to day increase in cost of gasoline for Iranian customers; the interested for using dual fuel automobiles are increasing. It is common to use steel CNG vessels in Iranian dual fuel cars. Nowadays; there are millions of CNG vessels with more than 10 years of commissioning time in Iran. Recently, periodic inspection regulations are issued by the Iranian Standard bureau. In this regulation, visual inspections are considered as the main method of inspection, however, for critical vessels it is strongly recommended to use ultrasonic inspections and/or hydraulic tests. Because of the importance of the topic for the safety of the citizens, this paper dedicated to investigate the statistics of the CNG vessels and their most common defects in country. In addition, the periodic inspection procedure of the Iranian regulations is compared with international counterparts. According to the discussion, inspection measures which considered by the Iranian standard bureau are enough and useful for standard CNG vessels; however, more than 25% of all CNG vessels in Iran are manufactured in nonstandard manners and they need more inspection measures. It seems that reducing of the inspection period from 36 months to 24 months will be of value.

**Key words:** CNG vessels; dual fuel cars; visual Inspection.

## ارزیابی خوردگی در لوله‌های انتقال آمونیاک توسط پرتونگاری دیجیتال و موجک مختلط

امیر موافقی<sup>۱\*</sup>، نورالدین محمدزاده<sup>۲</sup>، عفت یاحقی<sup>۳</sup>، جهانگیر نکوئی<sup>۴</sup>، پیمان رستمی<sup>۴</sup> و غلامرضا مرادی<sup>۵</sup>

۱ دانشیار، مهندسی هسته‌ای-پرتونگاری، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

۲ مربی، فیزیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

۳ دانشیار، مهندسی هسته‌ای-پرتونگاری، گروه فیزیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۴ کارشناس، شرکت مهندسی پرتو آزمون آذر، تهران

۵ کارشناس، مجتمع پتروشیمی خراسان، بجنورد

\* amovafeghi@aeoi.org.ir

### چکیده

بازرسی لوله‌های انتقال نفت و گاز و مواد شیمیایی، از مهمترین مشکلات در صنعت انتقال مواد است. عدم تشخیص خوردگی‌ها در این لوله‌ها، منجر به بروز حوادثی می‌شود که خسارات جانی و مالی جبران‌ناپذیری دارد. با توجه به زیر بار بودن این لوله‌ها نیاز به آزمون‌هایی است که بدون هر گونه تخریب بتوان به مقدار و محل خوردگی لوله دست پیدا کرد. یکی از این آزمون‌های غیرمخرب که در این امر استفاده می‌شود، پرتونگاری صنعتی است. در این روش صفحه حساس که اطلاعات را ثبت می‌کند بدور لوله بسته شده و با تابش اشعه ایکس یا گاما به لوله اطلاعات درونی و خوردگی‌های آن روی صفحه حساس ثبت می‌شود. به علت پراکندگی، تصاویر حاصل نیاز به پردازش دارند تا نواحی عیوب و خوردگی در آنها واضح‌تر شود. مفسرین و متخصصین تصاویر پرتونگاری برای تشخیص نواحی عیوب به تصاویری با کیفیت و کنتراست بهتر نیاز دارند. الگوریتم‌های پردازش تصویر می‌توانند در این امر کمک کنند. الگوریتم موجک مختلط تصویر را به مولفه‌های مختلف فاز و دامنه تجزیه کرده و حذف بعضی از این مولفه‌ها می‌تواند بر بهبود کنتراست تصویر موثر باشد. در این تحقیق از روش موجک مختلط برای حذف زمینه و وضوح تصاویر استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که این روش کارایی قابل قبولی در بهبود کنتراست تصاویر پرتونگاری در نواحی خوردگی لوله‌های حاوی آمونیاک داشته و ارزیابی متخصصین پرتونگاری صنعتی نیز بهبود تصاویر را با درصد بالایی تأیید می‌کند.

**واژگان کلیدی:** پرتونگاری صنعتی، روش موجک مختلط، خوردگی، لوله‌های آمونیاک

### ۱- مقدمه

در صد و پنجاه سال اخیر اختراعات و ابداعات صنعتی پیشرفت چشمگیری داشته و با پیشرفت و گسترش آن‌ها زندگی بشر دستخوش دگرگونی شده است. یکی از مباحث علمی، فنی و اقتصادی که کمتر از یکصد سال است توجه عده‌ای از دانشمندان را به خود جلب نموده و مطالعات زیادی روی آن انجام گرفته موضوع خوردگی فلزات است. بطور عمده زنگ زدن و ترکیب شیمیایی آهن و فولاد از مهمترین شکل‌های خوردگی هستند، هر چند خوردگی در مورد فلزات دیگر و مواد غیر فلزی نظیر پلاستیک، بتون و سرامیک و غیره نیز دیده می‌شود اما با توجه به نقش آهن و فولاد در صنایع و تجهیزات کارخانجات و نیز نقش آن صنایع نفت و گاز پتروشیمی این مسئله در مورد آهن و فولاد از اهمیت بسیاری برخوردار است.

امروزه مسائل خوردگی در فلزات در ابعاد وسیعی مورد توجه قرار گرفته است چرا که اصولاً اغلب فلزات در طبیعت به صورت سنگ معدن - لیمونیت و گوتیت - و به حالت ترکیب یافت می‌شوند. لذا کاربرد آن‌ها مشمول فراگیری‌های متعدد و در عین حال دشوار و پر هزینه و زمان است و سرمایه کلانی را در این خصوص می‌طلبد. خسارات ناشی از خوردگی یک واقعیت اجتناب‌ناپذیر در زندگی ماشینی امروزی است و در همه جا از فضا گرفته تا روی خاک، زیر خاک و در دریاها، تاسیسات و ابزار آلات ساخته دست بشر را مورد تهدید قرار می‌دهد. درجه حرارت، اختلاف پتانسیل عملیات حرارتی، شرایط سطحی، ناخالصی‌های محیطی و... روی خوردگی تأثیر دارند. یکی از مهمترین مسائل در صنعت انتقال مواد شیمیایی، خوردگی لوله‌هاست که عدم بررسی به موقع آن باعث خسارات جانی و مالی جبران‌ناپذیری خواهد شد. در

متعامد در فضای دو بعدی داشته باشیم و بر خلاف فوریه می‌تواند در حوزه زمان و فرکانس، محلی گردد و اطلاعات محلی دقیقی از سیگنال را استخراج نماید [۹-۶]. در نتیجه، استفاده از تبدیل موجک در کاربردهایی که سیگنال دارای مشخصات غیر ایستا با مولفه‌های فرکانس بالا هستند (مثل داشتن جهش و یا قله درسیگنال) بسیار مناسب‌تر از فوریه عمل می‌کند. تئوری تبدیل موجک در چند سال اخیر بسیار توسعه یافته و هم اکنون دارای کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف است. تبدیل موجک گسسته را می‌توان بر روی سیگنال‌های دو بعدی همچون تصویر اعمال کرد. تبدیل موجک گسسته از ساختار چندتجزیه‌ای استفاده می‌کند که در آن یک سیگنال با استفاده از یک مجموعه صافی برای چندین بار تجزیه می‌شود. دو صافی یکی بالا گذر و دیگری پایین گذر مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر ورودی تصویر باشد در ابتدا عملیات عبور از صافی به صورت افقی انجام شده و در مرحله بعد عملیات عبور از صافی به صورت عمودی روی سیگنال اعمال می‌شود. حساس بودن نسبت به تغییر مکان و تعداد محدود جهت انتخابی تبدیل موجک گسسته، دو مشکل اصلی این الگوریتم هستند. به این دلایل مدلی از تبدیل موجک گسسته تحت عنوان تبدیل درخت دوتایی تبدیل موجک مختلط مطرح شده است. این تبدیل تقریباً تغییر ناپذیر با جابجایی است و همچنین دارای تعداد جهت‌های بیشتری است [۹-۸]. تبدیل موجک گسسته یک بعدی، برای سیگنال ورودی  $x(t)$  برای توابع موجک  $\phi$  و مقیاس  $\psi$  چنین است:

(۱)

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c(n)\phi(t-n) + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} d(j,n)2^{\frac{j}{2}}\phi\left(2^{\frac{j}{2}}t-n\right)$$

که در آن  $d(j,n)$  ضرایب مقیاس و  $c(n)$  ضرایب موجک هستند که با روابط مشخصی محاسبه می‌شوند. در تبدیل موجک مختلط، تابع موجک و مقیاس به شکل مختلط در نظر گرفته می‌شوند (شکل ۱).

(۲)

$$\begin{aligned}\psi_c(t) &= \psi_r(t) + j\psi_i(t) \\ \phi_c(t) &= \phi_r(t) + j\phi_i(t)\end{aligned}$$

حالتی که نیاز به بررسی لوله‌های تحت بار باشد کار دشوارتر خواهد شد چون زمانی که سیستم در حال کار است و مواد شیمیایی در داخل لوله‌ها جریان دارد و ارزیابی لوله‌ها مشکل‌تر است [۳-۱].

برای بررسی خوردگی لوله‌های انتقال، روش‌های فیزیکی و شیمیایی وجود دارد. یکی از این روش‌های پر کاربرد و غیرمخرب، پرتونگاری صنعتی است. در این روش از اشعه گاما و یا ایکس برای بررسی خوردگی فلزات استفاده می‌شود. عبور اشعه از ماده با ضریب تضعیف آن متناسب است [۵-۴]. با آشکارسازی اشعه عبوری روی فیلم در پرتونگاری سنتی و صفحات فسفری در پرتونگاری دیجیتال تصاویر خوردگی درون لوله‌ها مشخص می‌گردد. بعلت وجود سیال در داخل لوله‌ها، شرایط خاص پرتونگاری در ارتفاع، وجود اجسام بزرگ و تجهیزات غیر قابل انتقال، تصاویر پرتونگاری دارای نویز می‌باشد. حذف این نویز و افزایش کنتراست تصاویر می‌تواند در شناسایی بهتر خوردگی لوله‌ها کمک کند. برای بهبود کیفیت تصاویر از روش‌های پردازش تصویر می‌توان استفاده کرد. این روش‌ها هر کدام بر مبنای اصول ریاضی استوار هستند و ویژگی‌هایی از تصویر را مشخص می‌کنند. تبدیل موجک یکی از کارآمدترین روش‌های ریاضی است که برای بهبود تصاویر بکارگرفته می‌شود. این الگوریتم انواع مختلفی مانند موجک گسسته، موجک منحنی و موجک مختلط، دارد. این تبدیل تصاویر را به زیرباندی تقسیم می‌کند که هر کدام از آنها جزئیات مختلفی از تصویر را دارد و برای بازسازی، فشرده‌سازی، حذف نویز و لبه‌یابی می‌توان از آنها استفاده کرد [۷-۵]. در این تحقیق از تبدیل موجک مختلط برای بهبود کیفیت تصاویر رادیوگرافی لوله‌های آمونیاک تحت بار استفاده شده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- موجک مختلط

تبدیل موجک یکی از پرکاربردترین تبدیلات ریاضی در حوزه پردازشی و به ویژه پردازش سیگنال و تصویر است. با توجه به ماهیت تجزیه و تحلیل بر اساس قدرت تفکیک، این تبدیل جای خود را در بسیاری از کاربردهای پردازشی باز کرده است. تئوری تبدیل موجک می‌تواند جایگزینی بسیار مناسب برای تئوری فوریه در بسیاری از کاربردها باشد. موجک این امکان را فراهم می‌آورد که پایه‌های

و برای پرتونگاری از صفحات CR استفاده شده است. تصاویر دیجیتال شده با فرمت TIFF درون کامپیوتر ذخیره شده و نرم افزار استفاده شده برای انجام پردازش‌های بعدی بر روی این تصاویر، نرم افزار متلب (MATLAB ۲۰۱۳) بوده است.

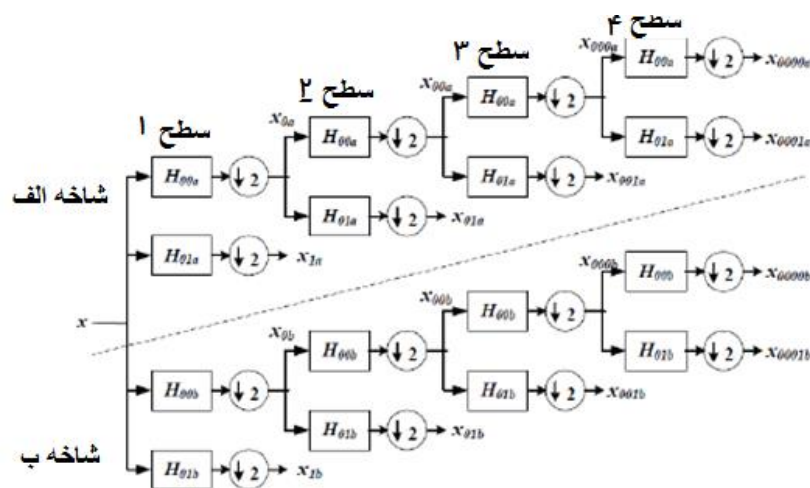
در کلیه آزمایش‌های پرتونگاری شامل انجام پرتونگاری استانداردهای مربوطه سری ISO، ASTM و ASME در نظر گرفته شده تا کلیه آزمایش‌ها و نتایج حاصله تکرارپذیر باشند و نتایج یکسانی را حاصل کنند. در کلیه آزمایش‌های پرتونگاری، ایمنی و حفاظت در برابر اشعه مطابق با قانون حفاظت در برابر اشعه کشور و استاندارد ملی شماره ۷۷۵۱ (که توسط سازمان انرژی اتمی ایران مطابق استانداردهای جهانی مصوب شده است) رعایت شده است [۱۱، ۱۰].

در تصاویر پرتونگاری عیب‌های جوش بر روی زمینه تصویر قرار گرفته‌اند. این عیب‌های جوش نسبت به زمینه تصویر، دارای شدت متفاوتی هستند، در چنین تصاویری، شدت به عنوان ویژگی تمیز دهنده برای استخراج عیب‌ها از زمینه تصویر به کار می‌رود. همچنین تصاویر تهیه شده پرتونگاری صنعتی دارای نویز زمینه ناشی از پراکندگی فوتونی هستند و کنتراست و وضوح کافی را ندارند و لازم است روش‌های پردازش تصویر برای اصلاح مقادیر پیکسل‌های تصویر دیجیتال شده بکار رود. پردازش‌هایی بر اساس مشخصات زمانی-فرکانسی تصویر می‌تواند در آشکارسازی عیوب مفید باشد.

در شکل ۱ تولید شاخه الف ضرایب حقیقی و شاخه ب ضرایب موهومی نشان داده شده است. با گذر مولفه‌های  $X$  از صافی‌های پایین گذر  $H$  برای ۴ مرحله، ضرایب محاسبه شده‌اند. اندیس‌ها نشان دهنده سطح ضرایب هستند. در تبدیل موجک مختلط نوسانات، تغییرات نسبت به جابجایی، دنداندار شدن تصاویر و جهت دار بودن ناکافی وجود دارند که در توابع مختلط این اشکالات تا حدودی رفع می‌گردد. انتخاب مقدار آستانه براساس تخمین و با مینیمم کردن مقدار خطا مقدار انجام می‌شود. جهت حذف نویز، مراحل زیر بر روی سیگنال اندازه‌گیری شده اعمال می‌شود: ابتدا سیگنال ورودی فیلتر شده و مجموعه ضرایب در هر سطح محاسبه می‌گردند. با استفاده از سطح آستانه مشخص شده، ضرایب کوچک حذف شده و در انتها، تابع موجک معکوس بر روی ضرایب موجک و مقیاس‌ها اعمال می‌شود. مجموع تمام مولفه‌های جزءها و تقریب‌های تخمین زده شده، سیگنال بدون نویز را به دست می‌دهد.

## ۲-۲- پرتونگاری

در پرتونگاری این لوله‌های انتقال، ولتاژ مورد استفاده ۲۷۰ kV، جریان ۵ mA و زمان پرتودهی ۲۰ دقیقه بوده است. این تصاویر در ارتفاع حدود پنجاه متری از سطح زمین برای لوله‌های زیر بار آمونیاک تهیه شده است. قطر لوله‌ها حدود ۸ تا ۱۰ اینچ بوده است. دستگاه پرتونگاری در حدود یک متری لوله‌های عایق بندی شده قرار گرفته



شکل (۱): ساختار درخت دوتایی تبدیل موجک مختلط یک بعدی در ۴ سطح [۸].

جدول (۱) درصد بهبود کنتراست و وضوح عیب

نوع عیب	تعداد	تصویر اصلی	تصویر بازسازی شده
حفره	۱۵	٪۷۰	٪۱۰۰
ترک	۲	٪۸۰	٪۱۰۰
تخلخل	۳	٪۸۰	٪۹۰
سایر عیوب	۷	٪۵۰	٪۷۰

### ۳- نتایج و بحث

در این تحقیق برای بهبود آشکارسازی عیوب پرتونگاری لوله‌های آمونیاک تحت بار، از تبدیل موجک مختلط استفاده شده است. تصاویر پرتونگاری حاوی عیوب تخلخل و حفره هستند که مطابق بخش ۲-۲ تهیه شده‌اند. نمونه‌ای از این تصاویر که پالایشگاه خراسان از لوله‌های تحت بار حاوی آمونیاک تهیه شده، در شکل ۲ نشان داده شده است. در شکل دیده می‌شود تصاویر به علت پراکندگی‌های زیاد پرتو ایکس مات و کدر هستند و نواحی عیب در آن‌ها مشخص نیست. برای وضوح تصویر از الگوریتم موجک مختلط استفاده شد. ابتدا اطلاعات فاز و دامنه تصاویر پرتونگاری در چهار سطح بدست آمده و سپس با اعمال سطح آستانه مولفه‌های کوچک آنها حذف شده و اعمال با عکس تبدیل موجک مختلط روی مولفه‌های تصحیح شده، تصاویر بازسازی شده بدست آمده‌اند.



شکل (۲): تصویر پرتونگاری اصلی

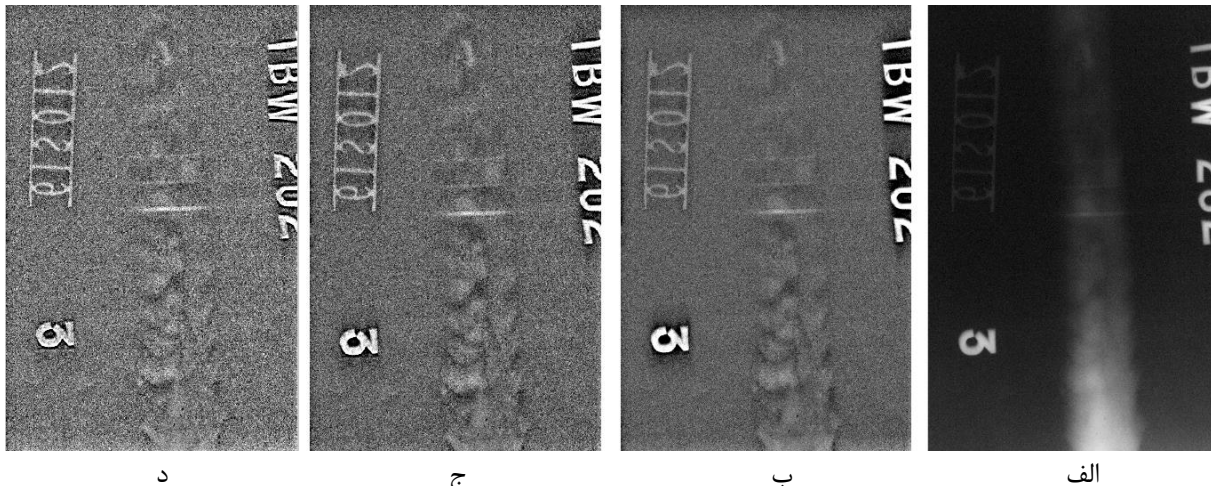
از مهمترین مشکلات اجرای الگوریتم تبدیل موجک مختلط برای از بین بردن نویز، تعیین مقدار آستانه است.

نویز تصاویر پرتونگاری بر اثر عوامل مختلفی مانند پراکندگی اشعه ایکس و نویز حاصل از دستگاه‌های الکترونیکی است تعیین میزان آن براحتی امکان پذیر نیست و به شرایط آزمایش بستگی دارد. با توجه به اینکه مقدار آستانه برای الگوریتم تبدیل موجک مختلط بستگی به مقدار نویز دارد؛ بنابر این لازم شد که تغییرات سطح آستانه بر روی تصاویر پرتونگاری مختلف بررسی شود. برای مقادیر مختلف سطوح آستانه الگوریتم موجک بر روی تصاویر مختلف پرتونگاری جوش اجرا شد. در شکل ۳ نتایج حاصل از تغییرات سطح آستانه در بازه ۱۰ تا ۵۰ برای پرتونگاره جوش نشان داده شده است. با توجه به شکل دیده می‌شود که تغییر سطح آستانه، در تغییر کنتراست تصویر اثر دارد. همچنین نتیجه حاصل از بررسی روی تصاویر مختلف نشان داد که نویز تصاویر یکسان نیست و سطح آستانه واحد برای همه تصاویر نمی‌توان در نظر گرفت. در نهایت با توجه به رابطه  $thr=2\log(\text{length}(I))$  [8] که در آن I تصویر حاوی نویز است، مقدار آستانه با توجه به تصویر محاسبه شده است. در شکل ۴ تصویر بازسازی شده شکل ۱ با توجه به این سطح آستانه بدست آمده است. در شکل دیده می‌شود که نواحی خوردگی و جوش روی شکل کاملاً مشخص شده‌اند که در شکل ۱ این نواحی بسختی قابل تشخیص بوده‌اند. برای ارزیابی از روش انسانی استفاده شد که در آن حدود ۲۷ ناحیه از عیوب در تصاویر پرتونگاری اصلی و تصویر بازسازی شده، به ۷ فرد که در پرتونگاری صنعتی مهارت دارند نشان داده و نظرات آنها در خصوص بهبود کنتراست و واضح شدن ناحیه عیب بررسی شد. جمع آوری نظرات آنها در مورد تصاویر بازسازی شده نشان می‌دهد که همه آنها بهتر شدن کنتراست در تصاویر بازسازی شده و در عین حال واضح‌تر شدن ناحیه عیب را تأیید می‌کنند.

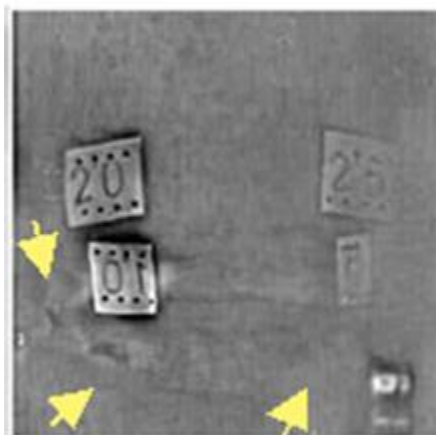
## ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، الگوریتم تبدیل موجک مختلط برای بهبود کنتراست در تصاویر پرتونگاری صنعتی از لوله‌های آمونیاک تحت بار به منظور تشخیص خوردگی، استفاده شده است. ابتدا ضرایب حقیقی و موهومی تصویر با تبدیل موجک در ۴ سطح محاسبه شده و سپس با اعمال سطح آستانه به آنها، نویز تصویر حذف شده است. تصویر نهایی

با ضرایب تصحیح شده در موجک مختلط با توجه به سطح آستانه، بازسازی شده است. برای ارزیابی از نظرات افراد متخصص در زمینه پرتونگاری صنعتی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند این الگوریتم در بهبود کنتراست تصاویر و واضح کردن نواحی عیوب خوردگی موثر است و متخصصان پرتونگاری وضوح نواحی عیوب را با درصد بالایی تأیید می‌کنند.



شکل (۳): الف تصویر پرتونگاری اصلی و تصویر بازسازی شده با سطح آستانه ب- ۵۰ ج- ۲۰ و د- ۱۰



شکل (۴): تصویر بازسازی شده شکل ۱

## ۵- منابع

- Journal of The British Institute of Non-Destructive Testing, 46, 7, 396-398.
- [5] ASME, (2004) Digital image acquisition, display, interpretation and storage of radiographs for nuclear applications. ASME Boiler and pressure vessel code and standard, Section 5, Article 2, Appendix 6, American Society of Mechanical Engineering.
- [6] Zhang, D., Kong, A., You, J., Wong, M. (2003). Online palmprint identification, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 25, 9, 1041-1050.

- [۱] اسکالی، جان.س. (۱۳۶۵) مبانی خوردگی. ترجمه دکتر رضا آلانی - چاپ اول تهران: مرکز نشر دانشگاهی.
- [۲] اسکوگ، و. (۱۳۷۱) مبانی شیمی تجزیه. جلد ۲، ترجمه عبدالرضا لاجقه، مرکز نشر دانشگاهی.
- [۳] شیخ‌زاده دونانی، ب. (۱۳۷۱) خوردگی. شرکت ملی گاز ایران.
- [4] Edalati, K., Rastkhah, N., Kermani, A., Seiedi, M., Movafeghi, A. (2004). In-service corrosion evaluation in pipelines using gamma radiography - a numerical approach. Insight the

- [9] Liao, S., Zhu, X., Lei, Z., Zhang, L., Li, S. (2007). Learning multi-scale block local binary patterns for face recognition. International Conference on Biometrics, 828-837.
- [۱۰] سازمان انرژی اتمی ایران، ۱۳۸۰. استانداردهای پایه حفاظت در برابر اشعه، معاونت نظام ایمنی هسته‌های کشور.
- [۱۱] موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، ۱۳۸۳. حفاظت در برابر پرتوهای یون‌ساز و ایمنی منابع پرتو- استانداردهای پایه، استانداردهای ملی ایران، استاندارد شماره ۷۷۵۱.
- [7] Caio, F.F., Cunha, C., André, T., Petraglia, C., M. R., Lima A., C.S. (2015). A new wavelet selection method for partial discharge denoising. Electric Power Systems Research, 125, 184–195.
- [8] Naderi, M. S., Gharehpetian, G. B., Abedi, M., Blackburn, T. R. (2006). Soft-Threshold Wavelet De-Noising Technique Application for a Single Arc Discharge Across a Static Gap. Proc. of 8th Int. Conf. on Properties and Application of Dielectric Materials, 1, 44–47.

## Evaluation of corrosion in ammonia transfer tubes by digital radiography and image processing

Amir Movafeghi<sup>1\*</sup>, Nooredin Mohammadzadeh<sup>1</sup>, Effat Yahaghi<sup>2</sup>, Jahangir Nekouei<sup>3</sup>, Peyman Rostami<sup>3</sup>, Gholamreza Moradi<sup>4</sup>

Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

Department of Physics, Faculty of Science, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Parto Azmoon Azar Engineering Co., Tehran, Iran

Khorasan Petrochemical Co., Bojnourd, Iran

\* amovafeghi@aeoi.org.ir

### Abstract

Inspection of oil and gas and chemical materials pipelines is one of the most important problems in the material transfer industry. Lack of corrosion detection in these pipes causes irreparable human and financial accidents. Due to the under loading of these pipes, kind of tests are needed that can be achieved to location of corrosion without any damage to the tube. One of these destructive tests is industrial radiography, which is used in this case. In this method, the sensitive plate is closed around the tube and transmitted X-rays or gamma-ray and the location of corrosion are recorded the sensitive plate. Due to the scattering, the resulted images need to be processed in order to clear the areas of defect and corrosion regions. Interpreter and radiographers need images with better quality and contrast to detect areas of defects. Image processing algorithms can help. The complex wavelet algorithm, using image decomposition into various phase and domain components and removing some of these components, can be effective in improving image contrast. In this research, the complex wavelet method was used to remove the background and clarity of images. The results show that this method has acceptable performance in improving the contrast of radiographic images in corrosion areas of ammonia tubes. And the evaluation of industrial radiography also confirms the improvement of images with a high percentage.

**Keywords:** Industrial Radiography, Complex Wavelet Method, Corrosion, Ammonia Tubes

## عیب‌یابی به روش فراصوتی بر روی لبه در آزمون خودکار با روش امتداد قطعه

فریدون میانجی\*<sup>۱</sup>، اسد باباخانی<sup>۱</sup>، عبدالله دادخواه<sup>۱</sup>، سمانه برادران<sup>۲</sup>

۱. شرکت مهندسی تابش پرداز پگاه، تهران

۲. دکترای مهندسی پرتویزشکی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای؛ پژوهشکده راکتور و ایمنی، تهران

\* fmianji@gmail.com

### چکیده:

عیب‌یابی به روش فراصوتی بر روی دو سر انتهائی لوله‌ها یا لبه قطعات کاری بسیار دشوار است که این مشکل در روش خودکار در بیشتر تجهیزات ساخته شده به وسیله شرکت‌های شناخته شده جهانی ناممکن اعلام می‌گردد. معمولاً بازه‌ای ده تا بیست سانتیمتری از هر سر قطعه به وسیله سازنده‌ها بیرون از محدوده آزمون اعلام شده و کاربر دستگاه ناچار از یافتن راهکاری برای رهایی از این کاستی می‌باشد. مهمترین دلیل این وضعیت هندسه قرارگیری نگاهدارنده پروب‌ها بر روی بدنه قطعه در زمان انجام آزمون است. از آنجائی که مجموعه‌ای از پروب‌های کاوشگر به کمک یک محفظه بسیار بزرگتر از ابعاد پروب بر روی قطعه حرکت داده می‌شوند، این امکان وجود ندارد که در زمان صفر آزمون (لحظه آغاز آزمون از یک انتها)، همه پروب‌های کاوشگر بتوانند امواج خود را بر روی لبه قطعه بفرستند. این کار حتی در آزمون دستی نیز ناممکن است و نمی‌توان در جهت همسو با جهت جاروب قطعه پروب را بگونه‌ای بر لبه قطع نشانید که امواج فراصوتی گسیل شده از آن بتوانند درست از لبه بدرون قطعه نفوذ نمایند. یکی از راهکارهای ممکن برای حل این مشکل بکارگیری روش غوطه‌وری است که در آن پروب و قطعه هر دو در کوپلانت قرار داده می‌شوند. این راه حل بدلیل نیاز به واردکردن قطعه یا لوله در مخزن کوپلانت روشی نسبتاً زمانبر برای آزمون خودکار قطعات بزرگ است. همچنین، آزمون خودکار بر پایه غوطه‌وری کامل پیچیده و پرهزینه می‌باشد. در این نوشتار یک روش تماسی نوین (بدون غوطه‌وری قطعه) همراه با تکنیک امتداد دهی قطعه برای حل این مشکل پیشنهاد گردیده که از سرعت بالاتر و پیچیدگی کمتری نسبت به غوطه‌وری غیرتماسی برخوردار بوده و امکان انجام آزمون بر روی لبه‌های قطعه با دقت بالا را فراهم می‌آورد.

**کلمات کلیدی:** آزمون خودکار، فراصوتی، غوطه‌وری، کوپلانت

### ۱- مقدمه

یکی از پرکاربردترین روش‌های آزمون غیرمخرب پس از پرتونگاری صنعتی آزمون فراصوتی است. توانائی این روش در شناسائی عیوب سطحی و عمقی و نیز توانائی آن در تشخیص اندازه و نوع عیوب با دقت بالا، از برتری‌های این روش درمقایسه با بسیاری از روش‌های غیرمخرب دیگر است. هنگامی که بی‌خطر بودن روش برای فرد آزمایش‌کننده نیز در نظر گرفته شود، آزمون فراآوائی از برتری قابل توجهی نسبت به روش کارآمدی همچون پرتونگاری صنعتی برخوردار است. برای انجام آزمون فراصوتی بر روی لوله‌ها و مخازن استانداردهای گوناگونی وجود دارد که برخی استاندارد کشوری بوده [۱] و برخی استاندارد جهانی می‌باشند [۲ و ۳]. استانداردهای آزمون فراصوتی برای هر گروه از تجهیزات تفاوت‌هایی با یکدیگر دارد: برای نمونه استاندارد مربوط به آزمون فراصوتی مخازن گاز

طبیعی فشرده [۴] با استاندارد آزمون میله‌های (لوله‌ها) سوخت هسته‌ای مورد کاربرد در راکتورهای اتمی یکسان نیست [۵]. یکی از مواردی که به وسیله استاندارد مربوط به آزمون تعیین می‌گردد دامنه آزمون یا سطح پوشش قطعه در آزمون است. برای نمونه ممکن است استاندارد انجام آزمون فراصوتی را تنها بر روی بخش استوانه‌ای سیلندر کافی اعلام نماید [۴] (شکل ۱) در حالی که استاندارد دیگری بر اجرای آزمون فراصوتی بر روی بخش‌های انتهائی (عدسی یا مخروطی شکل) قطعات تاکید ورزد. همچنین با توجه به بحرانی بودن دوسر لوله‌ها از نظر عیوب ورقه شدگی یا عیوب عرضی و طولی دیگر ممکن است بر انجام آزمون فراصوتی بر روی دوسر لوله بدون از دست دادن هیچ حاشیه تست نشده‌ای تاکید شود. دشواری موجود در زمینه انجام آزمون خودکار یا حتی دستی بر روی دوسر لوله‌ها، بویژه هنگامی که سرعت

راه کار دیگری را در پیش گرفت. سه راه کار ممکن در این زمینه عبارتند از:

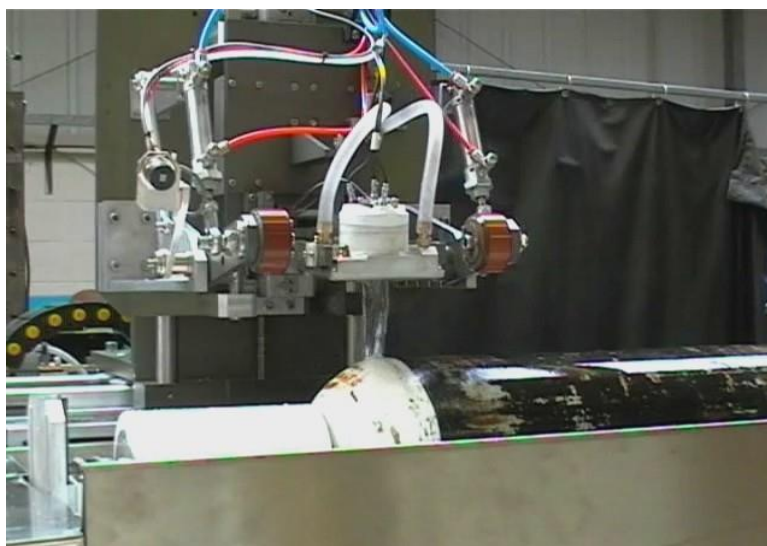
انجام آزمون فراصوتی بطور دستی بر روی نواحی تست نشده از دو سر لوله. کاستی این روش زمانبر بودن کار و نیز این نکته است که حتی در روش دستی نیز ناحیه‌ای هرچند کوچکتر (معمولا حدود ۲ تا ۳ سانتی‌متر)، در یکی از جهات مورد نیاز گسیل موج در قطعه، تست نشده باقی می‌ماند؛

انجام آزمون پرتونگاری بر روی دو سر لوله. کاستی این روش می‌تواند این باشد که بر پایه برخی استانداردها روش پرتونگاری قابل پذیرش نمی‌باشد (ناتوانی در تشخیص ورقه شدگی). همچنین هزینه‌ها، نیاز به نیروی کارشناس

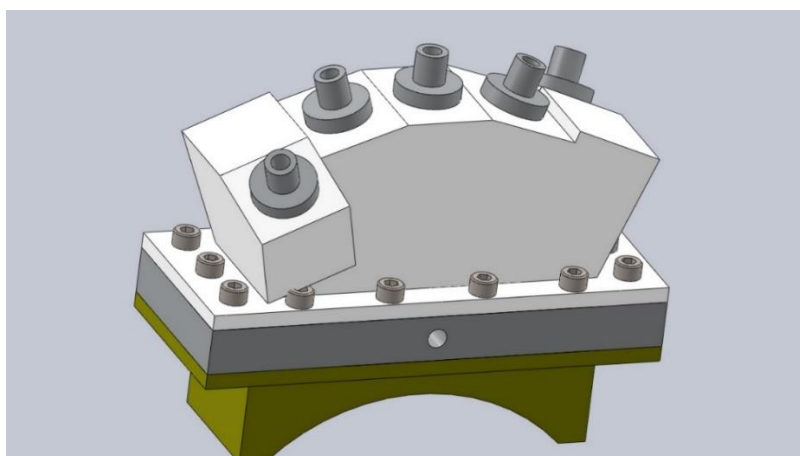
آزمون نیز از اهمیت زیادی برخوردار است (در تست همزمان با تولید بر روی خط تولید)، مورد توجه این مقاله بوده و راه کار و طراحی عملی برای چیره‌گی بر این دشواری جدی در این زمینه ارائه گردیده است.

## ۲- روش کار

از آنجا که بیشتر سازندگان تجهیزات آزمون فراصوتی خودکار در مشخصات دستگاه‌های ساخت خود اعلام می‌دارند که دستگاه نمی‌تواند آزمون بر روی دو سر لوله را پوشش دهد (معمولا ۱۰ سانتی متر از هر سر)، راهکار متداول در کارخانه‌های تولید یا نورد لوله بریدن دو سر لوله (ناحیه تست نشده) پس از انجام آزمون است. اما، در مواردی که بهر دلیل امکان اینکار وجود نداشته باشد باید



شکل ۱- انجام آزمون خودکار فراآوایی بر روی سیلندر گاز فشرده خودروئی بر پایه ایزو ۱۱۴۳۹ (عکس با اجازه شرکت مهندسی تابش پرداز - سازنده دستگاه). آزمون بر روی عدسی‌ها انجام نمی‌گردد.



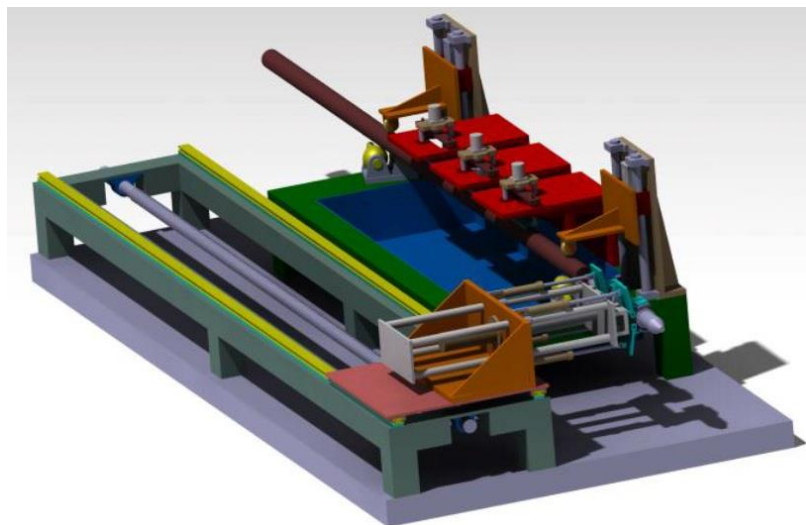
شکل ۲ - نگهدارنده پروب برای انجام آزمون خودکار فراآوایی بر روی سیلندر گاز فشرده خودروئی یا لوله‌ها. چهار پروب در دو راستای طولی و جهات مخالف و یک پروب بطور عمود موج فراآوایی را گسیل می‌دارند.

نگهدارنده پروب که دربرگیرنده تعدادی پروب بوده و در هر دو راستای عرضی و طولی در هر دو جهت امواج را گسیل می‌دارد نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود پروب‌های نصب شده در دو انتهای نگهدارنده که امواج را در راستای طولی و در دو جهت مخالف گسیل می‌دارند در صورت فرود نگهدارنده درست بر روی لبه لوله نخواهند توانست نقطه صفر لبه را با همه پروب‌ها مورد آزمون قرار دهند.

شکل ۳ سامانه طراحی شده برای انجام آزمون خودکار بر روی لوله‌ها را نشان می‌دهد که در آن از ایده امتداددهی لوله با لوله کمکی بهره گرفته شده است. در این روش نگهدارنده پروب در زمان آغاز تست بر روی لوله کمکی نشسته و با آغاز چرخش لوله سمت لوله اصلی حرکت می‌کند. بنابر این امواج گسیل شده از هر پروب امکان این را می‌یابند تا در همان نقطه صفر از لوله از سطح بیرونی لوله وارد بدنه آن گردند. بدین ترتیب، از نظر تئوری هیچ نقطه‌ای از سر لوله از دست داده نمی‌شود.

و محدودیت‌های ایمنی ویژه روش پرتونگاری نیز بر مجموعه تحمیل خواهد گردید؛ برخی سازندگان برای آزمون کامل دوسر لوله نیز راهکار خودکاری پیشنهاد داده و دستگاه خود را به بخش ویژه اینکار تجهیز می‌نمایند. این روش بسیار پرهزینه بوده و از سرعت آزمون نیز می‌کاهد.

در این مقاله طرحی برای جبران کاستی‌های مورد اشاره پیشنهاد شده است که بدون کاستن از سرعت آزمون نیاز به پوشش کامل دو سر لوله را نیز تامین می‌نماید. مبنای این روش گسترش طول لوله با ایجاد یک سطح هم‌تراز بوسیله بخش کمکی است که درست در زمان آغاز آزمون به سر لوله متصل شده و اجازه می‌دهد تا مجموعه نگهدارنده پروب‌ها از بیرون از سطح لوله آزمون را آغاز نموده و کم‌کم به سر واقعی لوله نزدیک گردد. بدین ترتیب همه پروب‌هایی که در جهات گوناگون امواج فراصوتی را گسیل می‌دارند می‌توانند از نقطه صفر لوله (از هر سر که محاسبه شود) امواج خود را بدون لوله بفرستند. برای روشن‌تر شدن موضوع در شکل ۲ یک



شکل ۳- یک سامانه طراحی شده بر پایه روش پیشنهادی امتداد سر لوله با لوله کمکی برای آزمون خودکار فراآوایی با توانایی پوشش هر دو سر لوله

گردید که بدون کاستن قابل توجه از سرعت آزمون می‌تواند با دقت زیاد و برابر با دقت انجام آزمون بر روی بدنه، آنها را ارزیابی نماید. تنظیم دقیق اندازه لوله کمکی و هم راستا نمودن خودکار آن با لوله اصلی از اهمیت زیادی برای انجام درست آزمون برخوردار است. در یک سامانه آزمون خودکار، باید همه تنظیم‌ها و اتصال و جدا

### ۳- نتیجه‌گیری

آزمون فراآوایی بر روی لوله‌ها با پوشش صد در صد بدنه و لبه‌ها از اهمیت زیادی در برخی از خطوط تولید برخوردار است. در این پژوهش با توجه به تجربه موجود در آزمون بر روی سیلندرهای و لوله‌ها، راه‌کاری برای تست دوسر لوله بدون از دست دادن هیچ ناحیه‌ای از لبه ارائه

welded tubes for the detection of laminar imperfections.

3. ISO 10893-10, 1st edition 2011. Non-destructive testing of steel tubes-Part 10: Automated full peripheral ultrasonic testing of seamless and welded tubes (except submerged arc-welded) steel tubes for the detection of longitudinal and/or transvers imperfections.
4. ISO 11439:2013, Gas cylinders-High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel storage for automotive vehicles.
5. ASTM B811-13, Standard Specification for Wrought Zirconium Alloy Seamless Tubes for Nuclear Reactor Fuel Cladding.

سازی لوله کمکی به لوله اصلی به وسیله دستگاه و با ایجاد کمترین تاخیر در عملکرد سامانه صورت پذیرد. ارزیابی‌ها و محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که این کار کمتر از ۱۰ ثانیه تاخیر در اجرای آزمون بر روی لوله ایجاد خواهد نمود که ناشی از توقف بیشتر لوله‌ها در ایستگاه تست برای اتصال لوله کمکی می‌باشد.

#### ۴-مراجع

1. API specification 5L forty-fifth edition, December 2012. Specification for line pipe.
2. ISO 10893-8, 1st edition 2011. Non-destructive testing of steel tubes-Part 8: Automated ultrasonic testing of seamless and

## Ultrasonic Flaw Detection of Edges in Automatic Testing through Object Extention

Fereidoun Mianji<sup>1</sup>, Asad Babakhani<sup>1</sup>, Abdollah Dadkhah<sup>1</sup>, Samaneh Baradaran<sup>2</sup>

1-Tabesh Pardaz Pegah Company; fmianji@gmail.com, ababakhani70@gmail.com, abdollah.dadkhah@gmail.com

2-Nuclear Science and Technology Research Institute, sbaradaran@aeoi.org.ir

### Abstract:

Edge flaw detection is a complicated task in ultrasonic testing, thus, majority of automatic testing system makers exclude this feature from their products. As a rule of thumb, a span of 10 to 20 cm of each end of objects is defined as the area that needs an alternative testing solution by the user. The reason for this is the geometrical limitations that a probe holder suffers in covering the body of to-be-tested parts. Owing to the fact that an array of search units implanted in a large housing (holder) ought to scan the surface of the object all together, some of them miss the edges when the holder positions on the extremities. This is an inevitable issue in manual approach too when the wave projection and scan direction are same. To resolve the problem, full-immersion method can be applied where both the object and probes are submerged in a liquid. Although, the need for sinking parts in a couplant makes it slow and costly for sizable parts like pipes and cylinders. This paper proposes a new contact technique for ultrasonic of edges based on extension of the objects' ends that offers a higher speed and less complexity compared to the full-immersion method.

Keywords: Automatic test, ultrasonic, immersion, couplant

## تخمین شکل و ابعاد ترک‌های سطحی ساختارهای فلزی در روش آزمون جریان گردابی

تیمور حیدری<sup>۱</sup>، سید حسین (حسام الدین) صادقی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری تخصصی، مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲. استاد، مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\* sadeghi@aut.ac.ir

### چکیده

آشکارسازی و اندازه‌گیری ترک‌های ناشی از خستگی در سطوح ساختارهای فلزی از کاربرد های مهم آزمون‌های غیرمخرب می‌باشد. یکی از روش‌های غیرمخرب برای این منظور، روش جریان گردابی می‌باشد. در این روش با استفاده از یک سیم پیچ حامل جریان متناوب در سطح قطعه جریان گردابی ایجاد می‌گردد. وجود ترک باعث به هم خوردن توزیع این جریان و در نتیجه تغییر امپدانس سیم پیچ می‌گردد. تخمین شکل و ابعاد ترک از روی تغییرات امپدانس سیم پیچ که یک مساله معکوس نامیده می‌شود برای تخمین عمرقطعه و استفاده بهینه از آن مهم می‌باشد. در این مقاله، یک مدل معکوس سازی مبتنی بر شناسایی پدیده و الگوریتم بهینه سازی ازدحام جمعیت جهت تشخیص شکل و عمق ترک‌ها از روی تغییرات امپدانس سیم پیچ ارائه می‌گردد. نتایج بدست آمده از تخمین شکل ترک‌ها از روی داده های اندازه‌گیری نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در تشخیص شکل و عمق ترک‌ها از دقت بالایی برخوردار

**واژگان کلیدی:** آزمون‌های غیرمخرب- جریان گردابی- بهینه سازی ازدحام جمعیت- معکوس سازی

### ۱- مقدمه

سطوح فلزات همیشه در اثر خوردگی و خستگی در معرض بروز ترک می‌باشند. از آنجایی که معمولاً مقدار تنش در روی سطح فلزات بیشتر از مقدار تنش در داخل آنها می‌باشد، ترک‌ها اغلب در روی سطح فلزات بوجود می‌آیند و داخل آن گسترش می‌یابند [1]. کشف و جلوگیری از رشد این ترک‌ها در مراحل اولیه ایجاد آنها از اهمیت بالایی برخوردار است. برای این منظور می‌توان از تکنیک‌های آزمون غیر مخرب استفاده کرد. این تکنیک‌ها بدون ایجاد خللی در ساختار فیزیکی و شیمیایی قطعه، آن را ارزیابی می‌کنند. تکنیک‌های مختلفی برای آزمون غیر مخرب ارائه شده اند که هر کدام کاربردها، معایب و مزایای خود را دارد [2].

یکی از تکنیک‌های مهم آزمون غیرمخرب برای بازرسی و ارزیابی سطوح ساختارهای فلزی روش جریان گردابی [3-4] است که با توجه به سادگی سیستم آزمون و ارزان و ایمن بودن آن کاربرد گسترده ای در صنعت دارد. در این روش فلز تحت بازرسی در مجاورت یک سیم پیچ حامل جریان متناوب قرار داده شده و بر اساس قانون فاراده و اهم جریان‌های گردابی در بدنه فلز القا می‌گردد. جریان‌های القایی در برخورد با ترک های موجود در قطعه در مقایسه

با حالت عدم وجود ترک دچار تغییراتی در مسیر حرکت خود می‌گردند که این به نوبه خود باعث ایجاد تغییراتی در چگونگی توزیع میدان مغناطیسی در اطراف قطعه و در نتیجه تغییر امپدانس سیم پیچ می‌گردد. با اندازه‌گیری تغییرات امپدانس سیم پیچ می‌توان محل و ابعاد ترک‌ها را تعیین نمود.

به تعیین شکل و اندازه ترک ها از روی سیگنال‌های اندازه گیری (تغییرات امپدانس سیم پیچ) مسئله معکوس اطلاق می‌شود و حل آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است. عمدتاً حل مسئله معکوس به صورت فرم بسته امکان پذیر نمی باشد و معمولاً برای معکوس سازی از دو دسته تکنیک مبتنی بر شناسایی پدیده و غیر مبتنی بر شناسایی پدیده استفاده می‌گردد.

تکنیک‌های غیر مبتنی بر شناسایی پدیده، تکنیک‌هایی هستند که با استفاده از تکنیک‌های پردازش سیگنال کار می‌کنند. دو روش معمول در این تکنیک‌ها، استفاده از منحنی های معکوس سازی و شبکه های عصبی می‌باشند. در استفاده از منحنی های معکوس سازی ابتدا برای ترک‌های مختلف سیگنال‌های خروجی سنسور از طریق اندازه گیری یا شبیه سازی تهیه می‌گردند. سپس مشخصه ای از این سیگنالها نظیر پیک سیگنال بر حسب

نظر گرفته می شود و سپس با استفاده از حل مسئله مستقیم، سیگنال خروجی سنسور برای این ترک شبیه سازی می گردد. با تعریف یک کمیت خطا، خطای بین سیگنال شبیه سازی و سیگنال اندازه گیری محاسبه و بر اساس خطای بدست آمده، و با استفاده از یک الگوریتم بهینه سازی، شکل ترک بگونه ای تغییر داده می شود که در مرحله بعد خطا کمتر گردد. تغییر شکل ترک و محاسبه خطا آنقدر تکرار می شود که خطا به کمترین مقدار خود برسد و شکل ترک بدست آید [9-10]. با وجود کند بودن این روش نسبت به استفاده از منحنی های معکوس سازی و شبکه عصبی، در این روش می توان انواع مختلف شکل ترک را با دقت مناسبی تخمین زد.

در این مقاله یک مدل معکوس سازی مبتنی بر شناسایی پدیده و الگوریتم بهینه سازی ازدحام جمعیت در روش جریان گردابی ارائه می گردد که قادر است شکل ترکهای موجود در سطح فلزات را از روی تغییرات امپدانس سیم پیچ القاگر به طور دقیق تخمین بزند.

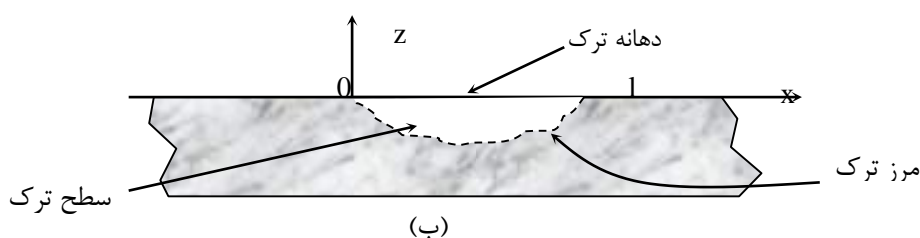
در بخش دوم این مقاله تئوری و شبیه سازی پاسخ القاگر در روش جریان گردابی توضیح داده می شود. سپس در بخش سوم، مدل معکوس سازی ارائه شده و نهایتاً در بخش چهارم با ارائه نتایج معکوس سازی حاصل از داده های اندازه گیری دقت مدل ارائه شده نشان داده می شود.

کمیتی از ترک نظیر عمق آن در یک منحنی رسم می شود. بعد از تهیه این منحنی می توان از آن برای آشکار سازی کمیت مورد نظر در ترک استفاده نمود. تهیه منحنی های معکوس سازی فقط برای ترکهای با شکل خاص و آنهم پارامترهای خاصی از آنها ( همانند عمق ترک در ترکهای طولی [5]) امکان پذیر می باشد و این در حالی است که در عمل ترکها شکل خاصی ندارند. بنابراین این روش در اکثر مواقع غیر قابل استفاده است. از طرف دیگر در روشهای مبتنی بر شبکه عصبی سیگنال خروجی سنسور به شبکه عصبی وارد شده و شبکه بر اساس آموزشی که دیده است، این سیگنال را به شکل ترک نگاشت میدهد [6-8]. روشهای معکوس سازی مبتنی بر شبکه های عصبی از سرعت و سادگی خوبی برخوردار هستند ولی تعمیم پذیری آنها نسبت به همه شکل های ترک اغلب امکانپذیر نیست.

در تکنیکهای مبتنی بر شناسایی پدیده که به آنها الگوریتمهای تکراری حل مسئله مستقیم نیز گفته می شود، به منظور یافتن شکل ترک از تکرار حل مسئله مستقیم استفاده می گردد. مسئله مستقیم به حالتی اطلاق می شود که در آن شکل و ابعاد ترک و سیم پیچ مشخص و امپدانس سیم پیچ (سیگنال اندازه گیری) مجهول می باشند. در تکنیکهای مبتنی بر تکرار حل مسئله مستقیم، ابتدا برای ترک یک یا چند شکل اولیه در



شکل ۱ الف



شکل (۱) الف - نمایش شماتیکی روش جریان گردابی در بازرسی یک قطعه ب - سطح مقطع ترک در صفحه  $xoz$

$E_i(r)$ 

$$= \mathbf{E}(r) - \int_{S_{crack}} \sigma \mathbf{E}(r') \cdot \mathbf{G}(r, r') ds(r') \quad (1)$$

که در آن  $E$  میدان الکتریکی کل،  $E_i$  میدان الکتریکی تابشی (میدان در محل ترک و در عدم حضور آن،  $\sigma$  رسانندگی فلز و  $G$  تابع گرین مسئله می‌باشد. با حل این معادله و مشخص شدن میدان الکتریکی در ناحیه ترک ( $E$ ) تغییرات امپدانس سیم پیچ از رابطه زیر بدست می‌آید:

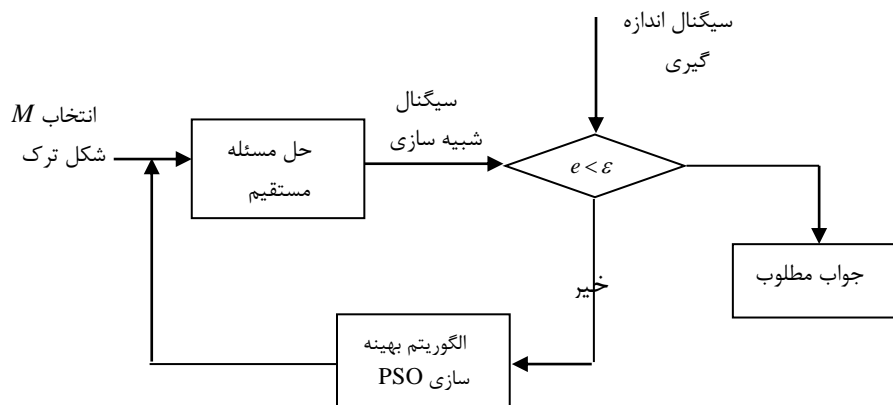
 $\Delta Z$ 

$$= -\frac{\sigma}{I^2} \int_{S_0} E_i(r) \cdot E(r) ds(r) \quad (2)$$

همانطور که از معادلات (۱) و (۲) مشخص است تغییرات امپدانس سیم پیچ، تابعی از شکل ترک ( $S_{crack}$ ) و همچنین شکل سیم پیچ القاگر و مشخصات الکتریکی قطعه ( $E_i$  و  $\sigma$ ) می‌باشد.

## ۲- تئوری و شبیه سازی پاسخ القاگر در روش جریان گردابی

در شکل (۱) نمایش شماتیکی روش جریان گردابی در بازرسی یک قطعه فلزی تخت نشان داده شده است. مطابق این شکل در سطح قطعه یک ترک بطول  $l$  و شکل دلخواه فرض شده است. دهانه ترک بسیار ریز بوده و فاصله بین سطوح آن لایه نازکی از هوا می‌باشد. محور  $x$  منطبق بر لبه ترک و محور  $y$  عمود بر آن می‌باشد. بوسیله یک سیم پیچ حامل جریان متناوب،  $I$ ، جریانات گردابی در سطح قطعه ایجاد می‌شود. فرکانس جریان عبوری از آن  $f$ ، به اندازه‌ای پایین است که بتوان از جریان جابجایی در بیرون فلز صرف‌نظر کرد. برای مسئله مستقیم مشخصات سیم پیچ و ترک معلوم، و تغییرات امپدانس سیم پیچ مجهول می‌باشند. برای حل این مسئله از روش مقاله [11] استفاده می‌گردد. در این روش برای ناحیه ترک معادله EFIE زیر فرض می‌شود:



شکل (۲) معکوس سازی مبتنی بر حل تکراری مسئله مستقیم و الگوریتم بهینه سازی ازدحام جمعیت

جدول (۱) مشخصات القاگر، قطعه و ترک در دو آزمایش جریان گردابی [۱۱]

	Expt.1	Expt.2
<b>Coil parameters</b>		
Inner radius	6.15±0.05 mm	2.51±0.01mm
Outer radius	12.4±0.05 mm	7.38±0.01mm
length	6.15±0.1 mm	4.99±0.01mm
Lift-off	0.88 mm	0.30 ±0.01mm
Number of turns	3790	4000
Frequency	900 Hz	417 Hz
<b>Conductor</b>		
conductivity	30.6±0.02 MS/m	22.62±0.06 MS/m
thickness	12.22±0.02 mm	24 mm
<b>Flaw</b>		
shape	rectangular	semielliptical
length	12.6±0.02 mm	22.1±0.05 mm
depth	5.0±0.05 mm	8.61±0.05 mm
opening	0.28±0.01mm	0.33±0.01 mm

## ۳- مدل معکوس سازی

شبیه سازی تغییرات امپدانس سیم پیچ القاگر برای شکل ترکهای مختلف در بخش قبل ارائه گردید. اما در کاربردهای عملی مسئله مهم تعیین شکل ترک از روی تغییرات امپدانس (سیگنال اندازه گیری) می باشد. بر این اساس در این بخش یک مدل معکوس سازی ارائه می گردد که با دریافت تغییرات امپدانس اندازه گیری شده شکل ترک را تشخیص دهد.

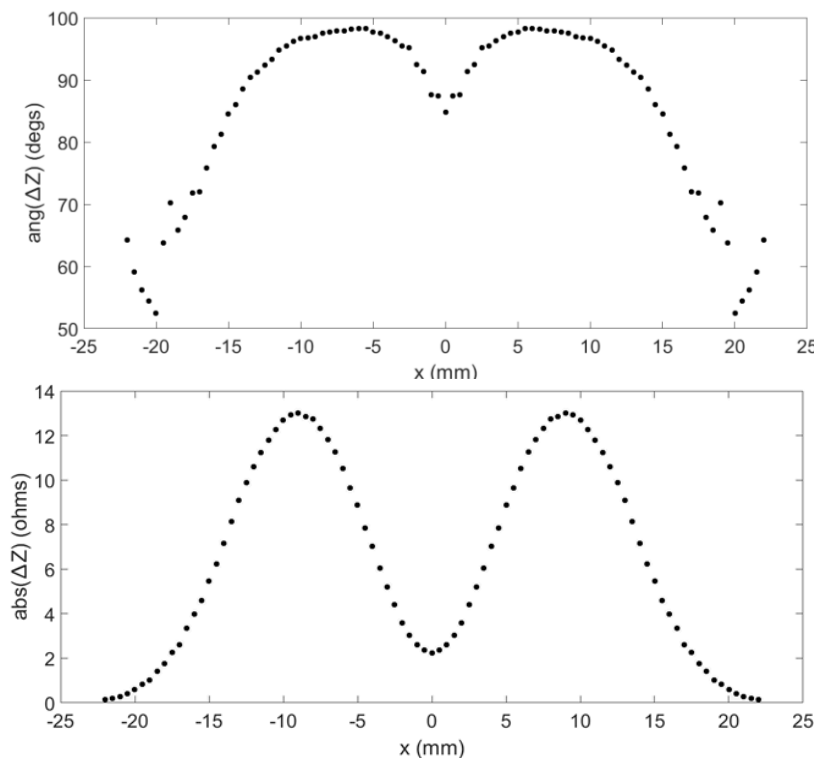
شکل (۲) بلوک دیاگرام مدل پیشنهادی را نشان می دهد. در این روش که بر حل تکراری مسئله مستقیم و الگوریتم بهینه سازی ازدحام جمعیت [12-13] استوار است، ابتدا تعداد  $M$  شکل ترک اولیه فرض شده و با حل مسئله مستقیم برای هر کدام، امپدانس سیم پیچ برای آنها شبیه سازی می شود. سپس داده های شبیه سازی با مقادیر اندازه گیری مقایسه شده و خطا برای هر شکل بدست می آید. اگر برای شکلی خطا کمتر از خطای تعیین شده باشد آن شکل بعنوان پروفایل ترک انتخاب می شود. در غیر اینصورت، شکلهای ترک بهینه شده و فرآیند تا حصول نتیجه قابل قبول تکرار می شود. در فرآیند معکوس سازی بالا، شکل هر ترک بصورت یک بردار  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{n-1}, d_n\}$  در نظر گرفته می شود که در آن  $d_k$  نشان دهنده عمق ترک در طول  $x_k = \frac{(k-1)l}{n-1}$

از ترک می باشد. بهینه سازی شکل ترکها با الگوریتم بهینه سازی ازدحام جمعیت انجام می گردد و اساس کار به این صورت است که در هر مرحله هر شکل ترک خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین حالتی که تاکنون در آن قرار گرفته است و بهترین حالتی که در کل همسایگی اش وجود دارد، تنظیم می کند. برای بهینه سازی شکل ترک  $n$ ام در گام  $(n+1)$  معادلات مربوطه به صورت زیر خواهند بود:

$$V_{n+1} = wV_n + c_1r_1(p_{best,n} - D_n) + c_2r_2(g_{best,n} - D_n) \quad (3)$$

$$D_{n+1} = D_n + V_{n+1} \quad (4)$$

که در آن بردارهای  $D = (d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{in})$  و  $V = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$  به ترتیب شکل و نرخ همگرایی ترک  $n$ ام می باشد. همچنین  $p_{best}$  و  $g_{best}$  به ترتیب برای بهترین حل ترک  $n$ ام و بهترین حل در بین کل ترک ها می باشد. پارامتر  $w$  یک وزن اینرسی است که معمولاً در محدوده  $[0, 1]$  انتخاب می گردد.  $c_1$  و  $c_2$  ثابتهای شتاب می باشند که معمولاً ۲ انتخاب می شوند [13]. همچنین  $\Gamma_1$  و  $\Gamma_2$  اعداد تصادفی در محدوده  $[0, 1]$  هستند.



شکل (۳) پاسخ سیم پیچ القاگر برای آزمایش اول (الف) - دامنه تغییرات امپدانس سیم پیچ (ب) - فاز تغییرات امپدانس سیم پیچ

$$E_t = \frac{1}{8} \sum_{k=1}^8 \left| 1 - \frac{f(k+1) + f(k)}{d(k+1) + d(k)} \right| \quad (5)$$

که در آن  $d(k)$  و  $f(k)$  به ترتیب عمق واقعی ترک و پاسخ مدل برای عمق عنصر  $k$ ام ترک می‌باشد. خطای کلی در تخمین ترک های شکل (۵) و (۶) به ترتیب ۲/۷ و ۸/۴ درصد می‌باشد که نشانگر دقت بالای مدل در تخمین شکل ترک ها می‌باشد.

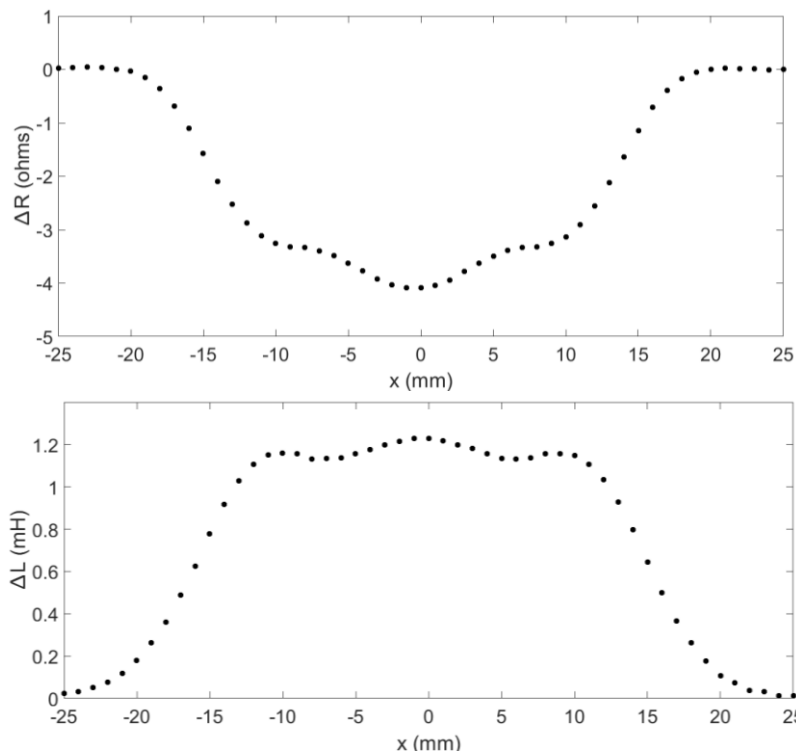
#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، جهت تشخیص شکل ترکهای ناشی از خستگی در سطوح قطعات فلزی یک مدل معکوس‌سازی در روش جریان گردابی ارائه گردید. مدل پیشنهادی مبتنی بر شناسایی پدیده می‌باشد که در آن از حل تکراری مسئله مستقیم و الگوریتم بهینه سازی ازدحام جمعیت استفاده می‌گردد. نتایج بدست آمده از اعمال سیگنالهای اندازه گیری به مدل پیشنهادی نشان داد که مدل قادر است با دقت بالایی شکل ترکها را تشخیص دهد. اگرچه در این مقاله نتایج برای ترک های موجود در سطوح فلزات غیرمغناطیسی ارائه گردید اما مدل پیشنهادی قابل استفاده برای فلزات فرومغناطیسی نیز می‌باشد و تنها تفاوت در روش حل مسئله مستقیم خواهد بود.

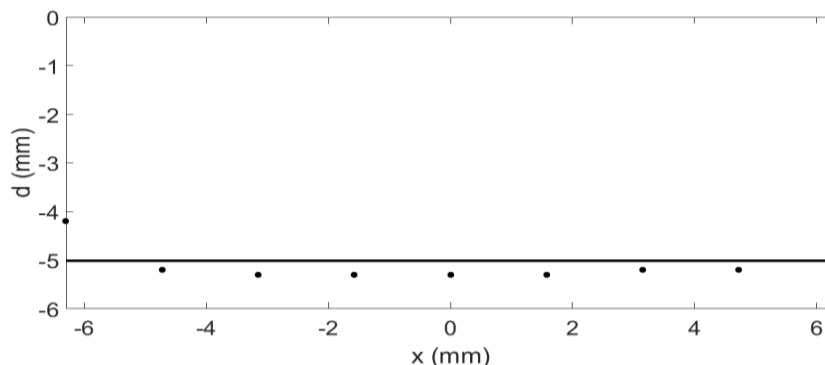
#### ۴- ارزیابی مدل با داده های اندازه گیری

برای ارزیابی مدل معکوس سازی ارائه شده از داده های اندازه [11] استفاده می‌گردد. اندازه گیری برای دو حالت مختلف انجام شده است. جدول (۱) مشخصات سیم پیچ الفاکر، قطعه تحت آزمون، و ترک را برای دو نشان می‌دهد. در هر آزمایش سیم پیچ در راستای دهانه آن حرکت کرده و تغییرات امپدانس آن اندازه گیری می‌گردد. شکل (۳) نتایج اندازه گیری تغییرات امپدانس را برای آزمایش اول در قالب دامنه و فاز نشان می‌دهد. نتایج اندازه گیری برای آزمایش دوم نیز بصورت تغییرات مقاومت و اندوکتانس سیم پیچ در شکل (۴) آمده است که قابل تبدیل به فرم دامنه و فاز امپدانس می‌باشد.

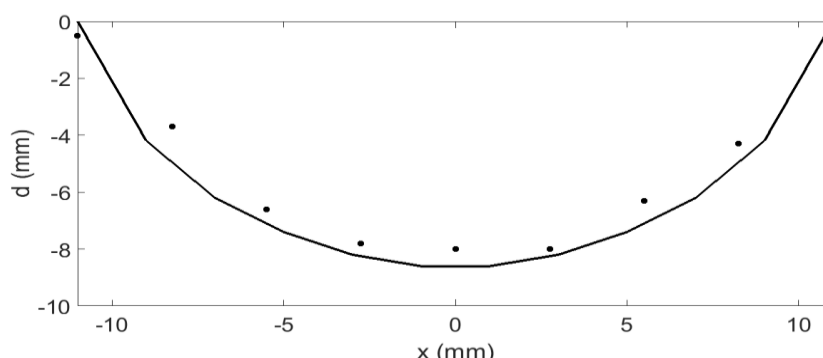
برای ارزیابی دقت مدل معکوس سازی، داده های اندازه گیری هر آزمایش به صورت دامنه و فاز وارد مدل می‌گردد. برای تخمین شکل ترک پروفایل آن بصورت یک بردار ۹ عنصری در نظر گرفته می‌شود که معرف عمق ترک در ۹ نقطه از طول ترک می‌باشد. ۱۰ شکل اولیه برای ترک در نظر گرفته شده و معکوس سازی انجام می‌شود. در شکلهای (۵) و (۶) پاسخ مدل معکوس‌سازی با شکل واقعی ترک، برای هر کدام از ترکها، نشان داده شده است. برای تعیین میزان خطای شبکه پارامتر خطای  $E_t$  بصورت زیر تعریف می‌گردد:



شکل (۴) پاسخ سیم پیچ الفاکر برای آزمایش دوم (الف) - تغییرات مقاومت الکتریکی سیم پیچ (ب) - تغییرات اندوکتانس سیم پیچ



شکل (۵) شکل واقعی (-) و پاسخ مدل معکوس سازی (...) برای آزمایش اول



شکل (۶) شکل واقعی (-) و پاسخ مدل معکوس سازی (...) برای آزمایش دوم

- Eddy Current Testing. IEEE International joint Conf. on Neural Networks, 6, 4033-4036.
9. Li, Y., Udpa, L., and Udpa, S. S. (2004). Three-Dimensional Defect Reconstruction from Eddy-Current NDE Signals Using a Genetic Local Search Algorithm. IEEE Trans. Magn., 40, 410-417.
  10. Badies, Z., Pavo, J., Komatsu, H., Kojima, S., Matsumoto, Y., and Aoki, K. (1998). Fast Flaw Reconstruction from 3D Eddy Current Data. IEEE Trans. Magn., 34, 2823-2828.
  11. Bowler, J.R. (1994). Eddy-current interaction with an ideal crack. J. Appl. Phys. 75, 8128-8137.
  12. Kennedy, J., and Eberhart, R.C. (1995). Particle swarm optimization", IEEE International Conference on Neural Networks, 4, (pp. 1942-1948), Perth, WA, Australia.
  13. Eberhart, R.C., and Shi, Y. (2001). Particle swarm optimization: Developments, applications and resources. IEEE Int. Conf. Evolutionary Computation, 1. Seoul, South Korea.

#### ۶- مراجع

1. R. I. Stephens, Metal Fatigue in Engineering, Wiley, New York, 2001.
2. Halmshaw, R. (1987). Non-Destructive Testing. Edward Arnold, 2th ed., London.
3. Burrows, M.L. (1964). Theory of eddy-current flaw detection. PH.D Dissertation University of Michigan.
4. Dodd, C. V. and Deeds, W.E. (1968). Analytical solutions to eddy-current prob-coil problems. J. Appl. Phys., 39, 2829-2838.
5. Mirshekar-Syahkal, D., Mostafavi, R.F. (1997). Analysis Technique for Interaction of High-Frequency Rhombic Inducer Field with Cracks in Metals. IEEE Trans. Magn, 33, 2291-2298.
6. Xiaoyun, S., Donghui, L., Kai2 G., Liweil, Z., Ran, Z., and Jianye, L. (2004). Neural Network with Adaptive Genetic Algorithm for Eddy Current Nondestructive Testing. In: IEEE Proc. of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. (pp. 2034-2037), Hangzhou, China.
7. Chady, T., Enkizono, M., Sikora, R. (2000). Neural Network Models of Eddy Current Multifrequency System for Nondestructive Testing. IEEE Trans. Magn., 36, 1724-1727.
8. Preda, G., Popa, R. C., Demachi, K., and Miya, K. (1999). Neural Network for Inverse Mapping in

## Detection and Sizing of Fatigue Cracks in Metallic Structures from Eddy Current Probe Signals

Teimour Heidari<sup>1</sup>, Seyed Hossein Hesamedin Sadeghi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> -Electromagnetics Laboratory, Department of Electrical Engineering,  
Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

\*sadeghi@aut.ac.ir

### Abstract

The use of Eddy Current (EC) technique has proved to be a viable means for crack detection and sizing in metals. In this technique, a crack is evaluated from the observation of probe impedance changes due to the interaction between induced current in a metal and the crack. Since the growth of fatigue crack in metals is a stochastic process, the cracks do not have a constant predetermined shape. Detection and Sizing of the cracks from probe signals witch called inverse problem is important for predicting the life of the workpiece. In this paper, an inverse algorithm based on the particle swarm optimization (PSO) technique is proposed for predicting the crack depth profile from EC probe signals. The validity of the proposed algorithm is demonstrated by comparing the actual and reconstructed depth profiles from measurement EC probe signals.

**Keywords:** Nondestructive testing, Eddy current, Inverse algorithm, Particle swarm optimization

## ارزیابی غیرمخرب گلوله‌های آسیا چدن پر کروم توسط آزمون جریان گردابی

مجتبی جواهری<sup>۱</sup>، مجید عباسی<sup>۲\*</sup>، نیما عزیزی<sup>۲</sup>، سید محمد علی بوترابی<sup>۴</sup>

۱. کارشناسی ارشد مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

۲. دانشیار گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل.

۳. کارشناسی ارشد مواد، دانشگاه صنایع و معادن ایران.

۴. استاد دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد.

\* abbasim@nit.ac.ir

### چکیده

در این تحقیق از آزمون غیرمخرب جریان گردابی برای ارزیابی میزان آستنیت باقیمانده در ریزساختار و سختی گلوله‌های آسیا از جنس چدن پر کروم استفاده شد. به این منظور نمونه‌هایی از گلوله چدن آلیاژی با ترکیب اسمی ۳۰ درصد وزنی کروم و ۳ درصد وزنی کربن و با قطر ۴۰ میلی‌متر پس از ریخته‌گری در ماسه انتخاب شدند. برای دستیابی به سختی و میزان آستنیت باقیمانده متفاوت، گلوله‌ها تحت سیکل‌های متفاوت حرارتی شامل دماهای مختلف آستنیت‌زایی و برگشت قرار گرفتند. مطالعات ریزساختاری توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی، XRD و سختی‌سنجی به روش ویکرز انجام شد. در ادامه با استفاده از یک دستگاه جریان گردابی، ریزساختار گلوله‌ها در فرکانس‌های مختلف ۵۰ تا 200 kHz مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با استفاده از روش جریان گردابی می‌توان ریزساختارهای مختلف گلوله‌ها با مقادیر متفاوت از آستنیت باقیمانده و سختی را به صورت غیرمخرب و سریع، شناسایی و تفکیک کرد. به این منظور، بازرسی جریان گردابی در فرکانس 150 kHz با استفاده از شاخص امپدانس به عنوان روش ارزیابی غیرمخرب انتخاب شده است. این شاخص با افزایش میزان آستنیت باقیمانده، کاهش می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** ارزیابی غیرمخرب، جریان گردابی، چدن پر کروم، گلوله‌های آسیا، آستنیت باقیمانده.

### ۱- مقدمه

معمولاً در آسیا، گلوله‌ها از جنس چدن پر کروم انتخاب می‌شوند، که وجود کاربید سخت در زمینه مارتنزیتی با مقدار کمی آستنیت باقیمانده می‌تواند بهترین مقاومت به سایش را برای شرایط کاری این نوع گلوله‌ها مهیا کند [۱، ۲]. ساختار اولیه آلیاژهای ریخته‌گری چدن پر کروم شامل شبکه دندریت‌های آستنیت است. هنگامی که درصد کروم بیش از ۱۱٪ و نسبت کروم به کربن بزرگتر از ۳/۵ باشد، کاربید M7C3 می‌تواند جایگزین کاربید M3C شود. این مورفولوژی اولیه می‌تواند تحت استحاله‌های با اهمیت از طریق عملیات حرارتی‌های متفاوت تغییر کند و به شکل مخلوطی از مارتنزیت/آستنیت با کاربیدهای ثانویه رسوبی به همراه دندریت‌های آستنیت اولیه تغییر پیدا کند که حداکثر سختی و مقاومت به سایش را در این سیستم نتیجه می‌دهد. لزوم استفاده از گلوله‌ها در آسیاب‌های بزرگ مدرن، هر چه بیشتر از آن را به ویژه در شرایط ضربه‌های

مکرر، مطرح کرده است، که این شرایط از طریق تنظیم صحیح میزان کربن و سپس عملیات حرارتی مناسب آلیاژ عملی است که آستنیت باقیمانده را تقریباً از بین می‌برد. بنابراین کنترل میزان آستنیت باقیمانده پارامتری بسیار مهم و کلیدی در آن است [۳، ۴].

امروزه برای بالا بردن اطمینان از کنترل کیفیت تمامی قطعات در خط تولید، از آزمون‌های غیرمخرب در صنعت استفاده می‌کنند. با استفاده از آزمون‌های غیرمخرب می‌توان عیوب موجود در قطعات از قبیل تخلخل و حفره‌های داخلی، ترک و ناپیوستگی‌های سطحی و داخلی، ناخالصی‌ها و انواع عیوبی که در حین فرآیند تولید و یا در حین کار تحت شرایط ویژه محیط کار ایجاد و شکل می‌گیرند را شناسایی نمود [۵، ۶].

آزمون جریان گردابی یا ادی کارنت یکی از آزمون‌های بسیار پرکاربرد در زمینه بازرسی و ارزیابی قطعات تولید شده می‌باشد. در آزمون جریان گردابی، رسانایی الکتریکی ماده به عنوان متغیر اصلی است. رسانایی در اثر عوامل متعددی تغییر می‌کند. این عوامل می‌تواند تغییر در

متالوگرافی، XRD، سختی سنجی با پاسخ آزمون غیرمخرب جریان گردابی.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- بررسی‌های مخرب

در این تحقیق از هفت عدد گلوله آسیا از جنس چدن پرکروم با ترکیب شیمیایی مطابق جدول ۱ و شکل ۱ و با قطر mm40 انتخاب شد. شش عدد از این گلوله‌ها مطابق جدول ۲ آستنیته و تمپر شده و سپس در دمای محیط به آرامی سرد شدند. بعد از انجام عملیات حرارتی، تمامی نمونه‌ها سنگ زده شده و از تمامی آنها آزمون سختی‌سنجی به روش ویکرز بر اساس استاندارد ASTM E9، تحت نیروی 30kg و زمان ۱۰ ثانیه و با حداقل سه بار تکرار با حداقل به عمل آمد. در ادامه، نمونه‌ها سنباده و پولیش شده و برای بررسی ریزساختار با محلول ویلا اچ شدند و ریزساختار آنها توسط میکروسکوپ نوری ارزیابی شد. برای بررسی مقدار آستنیت باقیمانده و مارتنزیت موجود در ریزساختار از روش تفرق اشعه X توسط دستگاه XRD، مدل Brucker D-8، با تابش  $\text{Cu K}\alpha$  تحت زاویه  $2\theta$  با ولتاژ 20KV و طول موج  $\lambda=1.5418\text{\AA}$  استفاده شد، که روی صفحات (۱۱۱) آستنیت، (۱۰۰) مارتنزیت و (۲۱۱) کاربید یوتکتیک بررسی شدند، درصد حجمی فازها پس از عملیات حرارتی براساس شدت پیک‌های به دست آمده از الگوی پراش اشعه X توسط نرم افزار X-Pert محاسبه شد. در روش تفرق اشعه X، میزان فاز آستنیت باقی‌مانده مطابق استاندارد ASTM E975-84 تعیین شد.



شکل (۱) گلوله‌های آسیا از جنس چدن پر کروم (قطر ۴۰ میلی‌متر).

ترکیب شیمیایی، تغییر در شبکه کریستالی و ریزساختار، تغییر دما وجود ناهمگنی مثل ترک و یا شکاف و تغییر ابعاد باشد. آزمون جریان گردابی در مقایسه با روش‌های دیگر غیرمخرب نظیر فراصوت و اشعه ایکس نسبتاً ارزان بوده و همچنین زمان دستیابی به نتایج در این روش بسیار سریع است. با عبور جریان متناوب از سیم‌پیچ، در داخل و اطراف سیم‌پیچ یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود که موسوم به میدان مغناطیسی اولیه است. با نزدیک شدن سیم‌پیچ به سطح یک ماده رسانا، میدان مغناطیسی سیم‌پیچ منجر به ایجاد جریان‌هایی در داخل ماده می‌شود که جریان‌های گردابی نامیده می‌شود. جریان‌های گردابی تشکیل شده در ماده باعث تشکیل یک میدان ثانویه در قطعه می‌شود. براساس قانون لنز، جهت جریان القایی به گونه‌ای است که میدان ناشی از آن با میدان ناشی از جریانی که آن را ایجاد کرده، مخالفت می‌کند. حضور عیب یا ترک و یا تغییرات ریزساختاری یا ترکیب شیمیایی موجب می‌شود که حرکت جریان گردابی دچار اختلال و یا تغییرات شود. این تغییرات بر روی میدان ثانویه تاثیر گذاشته و در ادامه منجر به اختلاف میان میدان ثانویه و اولیه می‌شود. با ارزیابی برهمکنش این میدان‌ها و کالیبره کردن سیگنال‌های دریافتی از نمونه‌های شاهد، می‌توان نوع و شدت اثر عامل تغییر میدان را ارزیابی کرد [۷-۹].

عباسی و همکاران [۱۰] اثر جریان گردابی بر قطعات استکان تاپیت خودرو که به روش کربونیتروره سخت کاری سطحی شده بودن را ارزیابی نموده و توانستند قطعات با عمق لایه سخت شده و میزان سختی متفاوت را از یکدیگر تفکیک کنند. کامرینی و همکاران [۱۱] مشخصات ریزساختاری یک فولاد زنگنزن دوفازی را توسط آزمون جریان گردابی ارزیابی کردند. کاشفی و همکاران [۱۲] اثر ریزساختارهای مختلف چدن را با آزمون جریان گردابی بررسی کردند. کونوپلایک و خان [۱۳، ۱۴] درصد پرلیت را در چدن با گرافیت کروی و فولاد ساده کربنی تعیین کردند.

هدف از انجام این تحقیق، ارزیابی و امکان سنجی تغییرات درصد آستنیت باقیمانده در گلوله‌های آسیا، با انجام سیکل‌های متفاوت عملیات حرارتی می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج آزمون‌های مخرب نظیر

جدول (۱) ترکیب شیمیایی گلوله‌های چدنی پرکروم (درصد وزنی).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
۲/۷۸	۰/۸	۰/۳۷	۰/۰۴	۰/۰۴	۲۹/۲	۰/۱۲	۰/۴۱	۰/۱۵	بقیه

جدول (۲) سیکل‌های عملیات حرارتی اعمالی بر روی گلوله‌ها.

شرایط تمپر		شرایط آستنیت‌ه		کد نمونه‌ها
زمان (min)	دما (°C)	زمان (min)	دما (°C)	
۱۲۰	۲۳۰	۱۰۰	۹۰۰	۱
		۱۸۰		۲
		۱۰۰	۹۵۰	۳
		۱۸۰		۴
		۱۰۰	۱۰۰۰	۵
		۱۸۰		۶

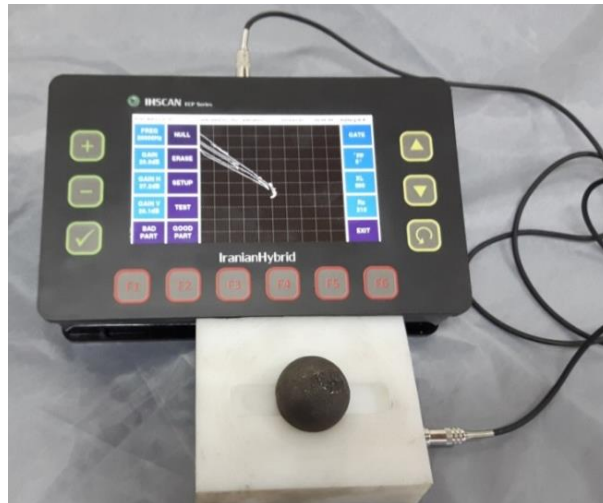
در شکل ۳ (ب) تا (د)، تصاویر از ریزساختار گلوله‌های عملیات حرارتی شده را نشان داده شده است. پس از انجام عملیات حرارتی زمینه آستنیت به مارتنزیت و کاربیدهای ثانویه تبدیل شده و همچنان مقدار کمی آستنیت باقیمانده حضور خواهد داشت. در دماهای ۹۰۰ و ۹۵۰ C نمونه دارای دندریته‌های آستنیت اولیه بوده که به مارتنزیت تبدیل شدند و کاربیدهای یوتکتیک M7C3 بدون تغییر به همراه کاربیدهای ثانویه دیده شده است. عملیات حرارتی در دمای ۱۰۰۰ C کاربیدهای ثانویه را ریزتر و یکنواخت‌تر کرده است. با افزایش درجه حرارت کاربیدهای بیشتری در آستنیت حل شده و دمای تشکیل مارتنزیت کاهش می‌یابد. در نتیجه میزان آستنیت باقیمانده افزایش می‌یابد. افزایش دمای آستنیت‌ه از طرفی باعث افزایش انحلال کروم و کربن در زمینه می‌شود و از طرفی به خاطر بالا رفتن دمای Ms میزان آستنیت باقیمانده بالا می‌رود، با حرارت دادن آلیاژ در دماهای بالا، کاربیدهای ثانویه از نوع M23C6 در زمینه رسوب کرده و آستنیت را از کربن و عناصر آلیاژی فقیر می‌کند. بنابراین ریزساختار نمونه‌های عملیات حرارتی شده شامل کاربیدهای یوتکتیک و زمینه حاوی آستنیت باقیمانده، مارتنزیت و کاربیدهای ثانویه است. عملیات حرارتی تأثیری بر روی کاربید یوتکتیک ندارد ولی می‌تواند توزیع و اندازه کاربیدهای ثانویه را تغییر دهد [۱، ۲].

## ۲-۲- بررسی غیرمخرب

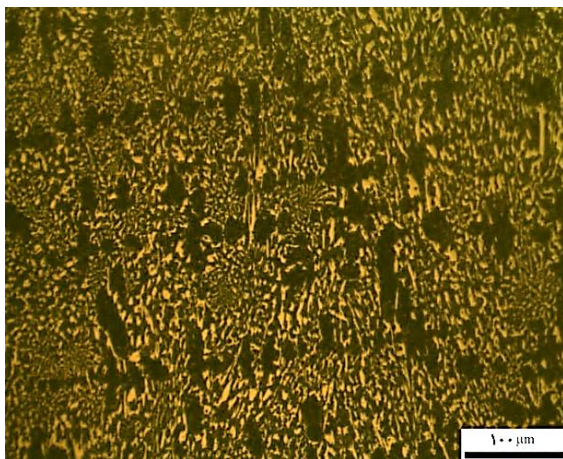
در این تحقیق از یک دستگاه جریان گردابی مطابق شکل ۲ ساخت شرکت ایرانیان هیبرید که قابلیت به کارگیری در محدوده فرکانس ۱۰۰ هرتز تا ۱ مگاهرتز را دارد، با پراب ساده هسته‌دار استفاده شد. از امپدانس (Z) و مقاومت القایی (XL)، به عنوان پاسخ جریان گردابی برای ارزیابی و تحلیل ریزساختار و سختی استفاده شد. در این تحقیق اثر فرکانس در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوهرتز مورد ارزیابی قرار گرفت. برای کالیبراسیون دستگاه، یک نمونه به عنوان نمونه شاهد انتخاب می‌شود. در این تحقیق از نمونه ریختگی (کد نمونه ۷) به عنوان نمونه شاهد مرکزی انتخاب شده است.

## ۳- نتایج و بحث

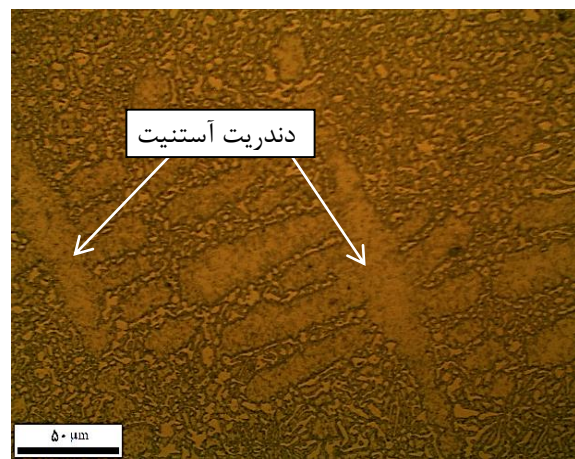
۳-۱- ارزیابی‌های مخرب ریزساختار و سختی شکل ۳ (الف)، تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار ریختگی گلوله چدن پرکروم را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ریزساختار گلوله‌های چدن پرکروم در حالت ریختگی به صورت دندریته‌های اولیه آستنیتی همراه با سل‌های یوتکتیکی آستنیت (پیکان سفید) و کاربیدهای M7C3 (سفید) است، که در حین سرد شدن برخی از آستنیت به مارتنزیت (فاز سیاه رنگ) تبدیل می‌شود.



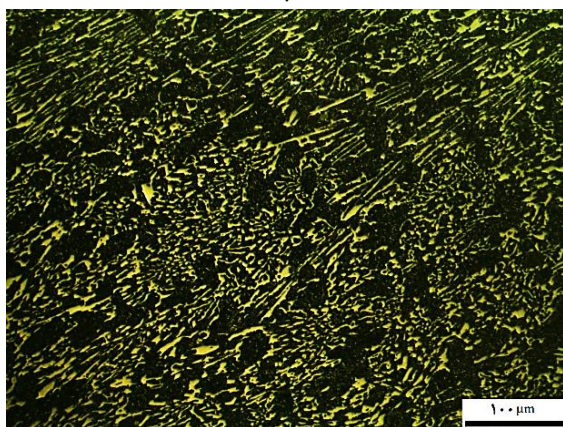
شکل (۲) دستگاه جریان گردابی به همراه پراب و فیکسچر مورد استفاده در آزمایش.



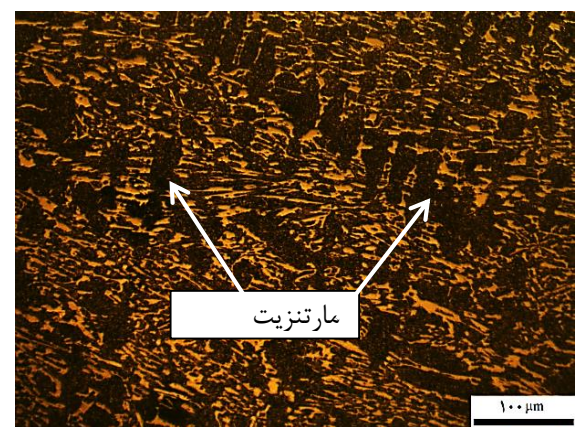
ب



الف



د



ج

شکل (۳) (الف) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه ریختگی، (ب) شرایط ۲، (ج) شرایط ۴، (د) شرایط ۵، (ه) شرایط ۶.

است. فازهای موجود در ریزساختار ریختگی چدن پرکروم شامل آستنیت، مارتنزیت و کاربیدهای یوتکتیک M7C3 است. نتایج نشان داد که پس از عملیات حرارتی فاز آستنیت به مارتنزیت تبدیل شده، مقدار پیک مربوط به

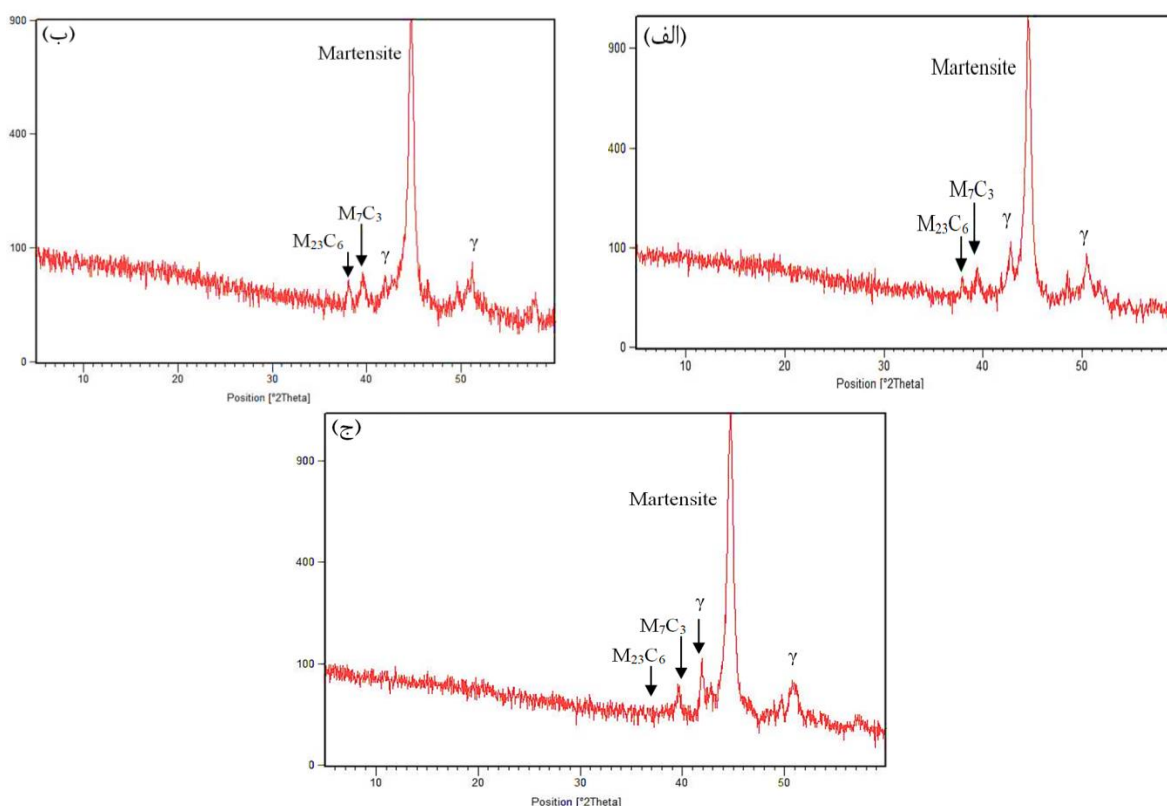
نتایج الگوی تفرق اشعه ایکس در شکل ۴، برای نمونه‌های عملیات حرارتی ارائه شده است. فازهای موجود در ریزساختار شامل مارتنزیت، کاربیدهای یوتکتیک M7C3، کاربید ثانویه M23C6 و آستنیت باقیمانده (۲)

سختی افزایش می‌یابد. در دماهای بالا آستنیت پرکربن بوده و کربن بیشتری در زمینه حل می‌شود. چون دمای شرایط آستنیت بالا است و نمونه از دمای بالا سرد می‌شود، درصد آستنیت باقیمانده افزایش یافته و مارتنزیت پرکربن حاصل می‌شود. از طرف دیگر دمای پایین آستنیت نیز سبب تشکیل مارتنزیت کم کربن شده و در نتیجه سختی را کاهش می‌دهد [۱۵].

فاز آستنیت کاهش یافت و پیک مربوط به فاز مارتنزیت افزایش یافته است. شدت پیک آستنیت باقیمانده برای نمونه عملیات حرارتی شده در دمای  $900^{\circ}\text{C}$ ، نشان دهنده میزان کمتر آستنیت باقیمانده در زمینه است و با افزایش دما شدت پیک افزایش یافته که نشان می‌دهد آستنیت باقیمانده در دماهای بالاتر بیشتر شده است. در جدول ۳، نتایج سختی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دمای آستنیت، میزان

جدول (۳) سختی گلوله‌ها بعد از عملیات حرارتی.

سختی (HV)	سیکل عملیات حرارتی	کد نمونه
۸۵۰	آستنیت در دمای $900^{\circ}\text{C}$ و زمان ۱۰۰ دقیقه	۱
۸۷۰	آستنیت در دمای $900^{\circ}\text{C}$ و زمان ۱۸۰ دقیقه	۲
۸۸۵	آستنیت در دمای $950^{\circ}\text{C}$ و زمان ۱۰۰ دقیقه	۳
۹۲۰	آستنیت در دمای $950^{\circ}\text{C}$ و زمان ۱۸۰ دقیقه	۴
۹۳۰	آستنیت در دمای $1000^{\circ}\text{C}$ و زمان ۱۰۰ دقیقه	۵
۹۵۰	آستنیت در دمای $1000^{\circ}\text{C}$ و زمان ۱۸۰ دقیقه	۶
۶۵۰	ریختگی	۷



شکل (۴) نتایج به دست آمده از آزمون XRD. الف) شرایط ۱، ب) شرایط ۲ و ج) شرایط ۳.

$\delta$  عمق نفوذ استاندارد است که برابر با ۳۷٪ مقدار میدان مغناطیسی ایجاد شده در سطح است. با توجه به رابطه (۱) با افزایش فرکانس، عمق نفوذ استاندارد جریان‌های گردابی کاهش می‌یابد که نشان دهنده افت نفوذپذیری مغناطیسی ماده است [۱۶]. شکل ۶، صفحه امپدانس بر حسب شاخص  $R_x$  (مقاومت اهمی) و  $X_L$  (مقاومت القایی) رسم شد که در آن موقعیت شاخص جریان گردابی (امپدانس،  $Z$ ) هر یک از نمونه‌ها در فرکانس ۱۵۰ kHz مشخص شده است. مشاهده می‌شود که نمونه‌ها موقعیت‌های مختلفی در صفحه امپدانس (صفحه نمایشگر دستگاه جریان گردابی یا صفحه اسیلوسکوپ) دارند که بیشترین تفاوت آنها در

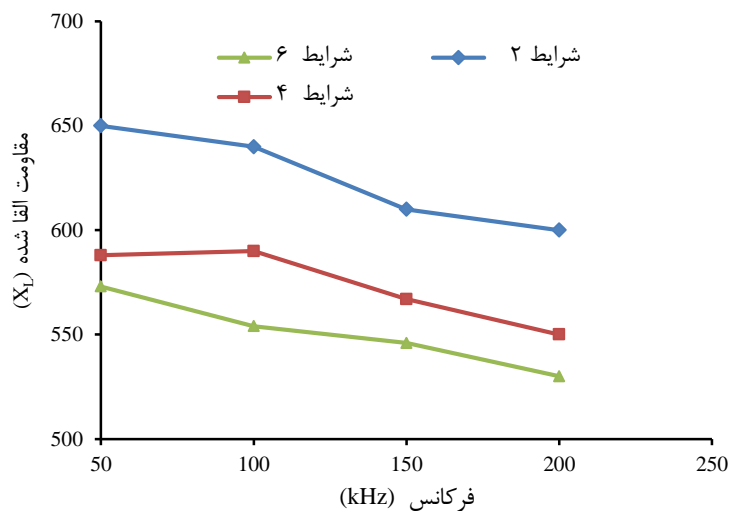
### ۳-۲- ارزیابی غیرمخرب ریزساختار و سختی

در شکل ۵، اثر فرکانس در محدوده ۵۰ kHz تا ۲۰۰ kHz بر روی مقاومت القایی برای سه شرایط (۱)، (۲) و (۳) نشان داده شده است. طبق بررسی‌های انجام گرفته مشاهده شد که بهترین تفکیک ریزساختاری در فرکانس ۱۵۰ kHz صورت پذیرفته است. در نتیجه این فرکانس به عنوان فرکانس کاری تعیین شد. همانطور که مشاهده می‌شود، در هر سه نمونه با افزایش فرکانس، مقاومت القاء شده کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه ریاضی (۱)، (۲) و (۳):

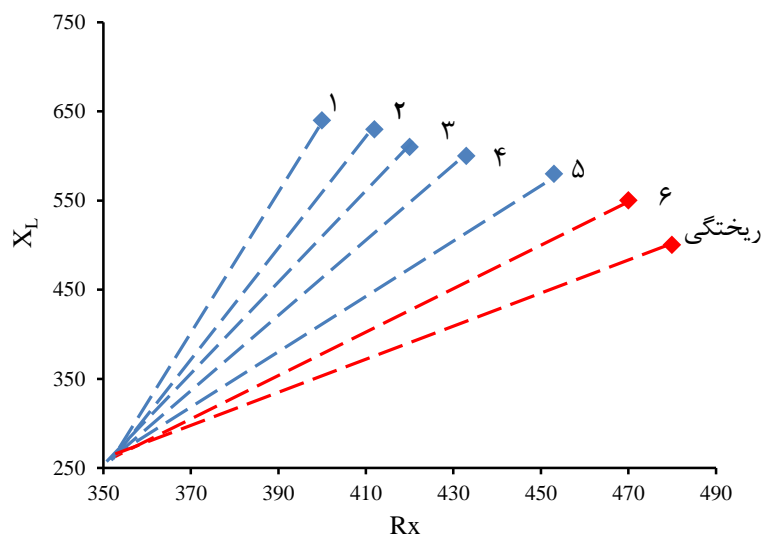
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

$$X_L = 2\pi f L \quad (2)$$

$$Z = \sqrt{(R_x^2 + X_L^2)} = \frac{V}{I} \quad (3)$$



شکل (۵) اثر فرکانس بر مقاومت القایی.

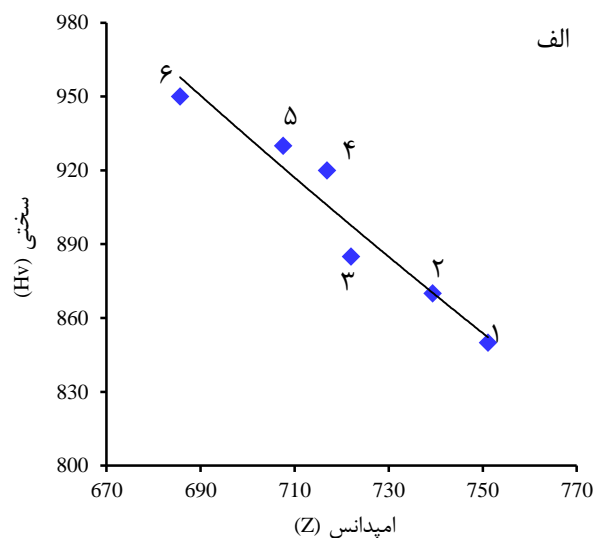
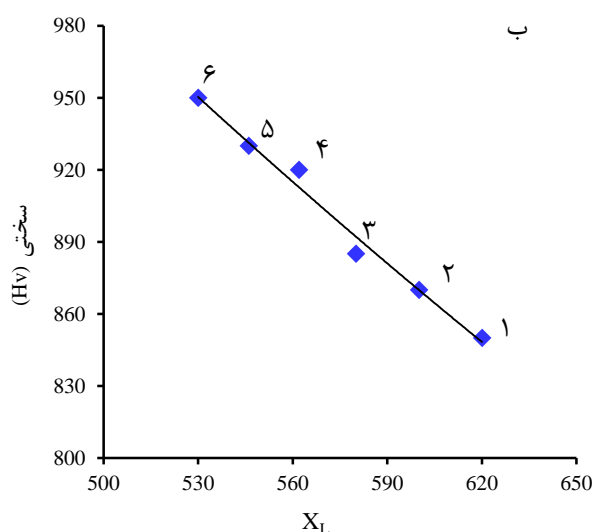


شکل (۶) تاثیر ریزساختار نمونه‌ها بر روی نحوه قرارگرفتن نقاط در صفحه امپدانس.

داشته باشد. افزایش دمای آستنیت از طرفی باعث افزایش انحلال کروم و کربن در زمینه می‌شود و از طرفی به خاطر بالا رفتن دمای Ms میزان آستنیت باقیمانده بالا می‌رود. با حرارت دادن آلیاژ در دماهای بالا کاربیدهای ثانویه از نوع M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> در زمینه رسوب کرده که تاثیر عوامل بیان شده بر روی خواص مغناطیسی ماده بسیار مورد توجه است، زیرا کاربیدها و آستنیت باقیمانده به عنوان مانعی در برابر جریان‌های مغناطیس عمل کرده و موجب قفل شدن حوزه‌های مغناطیسی می‌شود و به بیان دیگر آنها باعث کند شدن حرکت حوزه‌های مغناطیسی در ماده شده و ماده به سختی اشباع مغناطیسی می‌شود. همچنین افزایش پارامتر تراگونالیت، عیوب خطی شبکه (از قبیل نابجایی‌ها، مرزهای فرعی و غیره)، در این امر تاثیر بسزایی دارند. حضور چگالی بالایی از نابجایی‌ها، موجب تشکیل شبکه‌ای از نابجایی‌های در هم تنیده می‌شود و همچنین در کنار آنها دوقلوبی‌های سطحی نیز شکل می‌گیرند. حضور این عوامل موجب تشدید تنش‌های داخلی و تنش‌های چند بعدی در داخل شبکه می‌شود [۱۷، ۱۸]. اما در دماهای کمتر، امکان تشکیل کاربیدهای ثانویه از آستنیت غنی از کربن و کروم بیشتر فراهم می‌شود و با کاهش غلظت کربن محلول در آستنیت، شرایط تشکیل مارتنزیت بیشتر فراهم می‌شود. از این رو مقدار آستنیت باقیمانده در ریزساختار نهایی کاهش می‌یابد.

راستای محور عرضی (محور x یا همان شاخص Rx) است. با تنظیمات انجام شده در نحوه نمایش، به خوبی می‌توان گلوله‌ها را با توجه به موقعیت در صفحه نمایش پیش‌بینی کرد. موقعیت‌های سمت راست دارای آستنیت باقیمانده بیشتری نسبت به موقعیت‌های سمت چپ هستند و بر عکس نمونه ریختگی در قسمت راست نمودار قرار دارد و دارای بیشترین میزان آستنیت باقیمانده است. با افزایش دمای آستنیت، درصد آستنیت باقیمانده بیشتر شده و پاسخ آزمون جریان گردابی به سمت نمونه ریختگی حرکت می‌کند. به این ترتیب با استفاده از سامانه جریان گردابی طراحی شده به صورت گرافیکی از روی صفحه نمایش‌گر، می‌توان قطعات را بر اساس سختی و ریزساختار تفکیک کرد.

در شکل ۷، شاخص‌های مهم جریان گردابی نظیر XL و Z، برای تمامی نمونه‌ها نشان داده شده است. همچنین در شکل ۸ ارتباط میان درصد آستنیت باقیمانده مطابق با نتایج XRD با سختی و شاخص امپدانس برای سه نمونه ۲، ۴ و ۶ نشان داده شده است. همانطور که در رابطه (۲) و (۳) نشان داده شد، به ترتیب امپدانس و مقاومت القایی تابع نفوذپذیری مغناطیسی ماده است. آستنیت باقیمانده یک فاز پارامغناطیسی (□□□۲) است و حضور کاربیدهای حل نشده به همراه آستنیت باقیمانده موجب می‌شود که نمونه رفتاری شبیه به ماده غیرمغناطیس و غیرفلزی



شکل (۷) ارتباط میان شاخص‌های جریان گردابی با سختی در شرایط مختلف حرارتی الف: شاخص Z ب: XL.

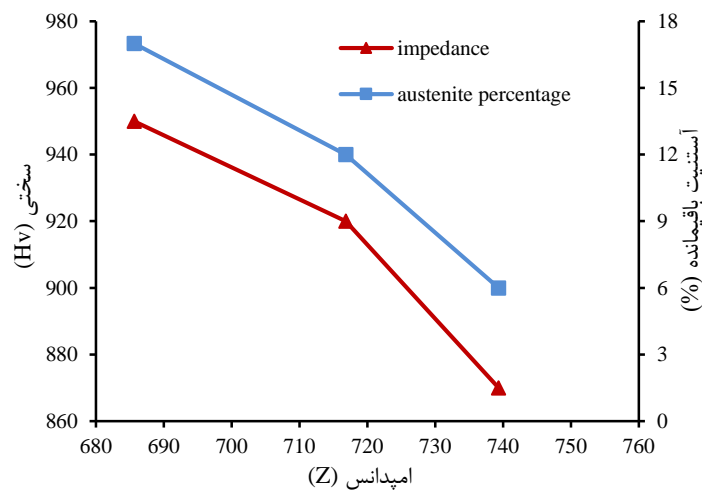
طراحی انجام شده و مجموع نتایج آزمون‌های مخرب و غیرمخرب مشاهده شد که می‌توان از روش جریان گردابی برای کنترل و تضمین کیفیت صد در صد میزان آستنیت باقیمانده در نمونه‌ها استفاده نمود.

#### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از حمایت‌های پژوهشکده سنگ آهن و فولاد گل گهر سیرجان و شرکت ایرانیان هیبرید شمال (مستقر در مرکز رشد فناوری دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل) صمیمانه تقدیر می‌کنند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با آزمون غیرمخرب جریان گردابی چگونگی تفکیک و ارزیابی گلوله‌های آسیا از جنس چدن پر کروم با میزان آستنیت باقیمانده و ریزساختار متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین آزمون‌های مخرب نظیر متالوگرافی، XRD، سختی‌سنجی برای تایید نتایج آزمون غیرمخرب جریان گردابی بکار گرفته شد. نتایج جریان گردابی نشان داد که شاخص امیدانس و مقاومت القایی به عنوان پاسخ جریان گردابی با افزایش میزان آستنیت باقیمانده، کاهش می‌یابد. همچنین بر اساس



شکل (۸) ارتباط میان میزان آستنیت باقیمانده و جریان گردابی (امپدانس) برای سه نمونه ۴.۲ و ۶.

[6] International Atomic Energy Agency. (2011)

Eddy Current Testing at Level 2, Vienna International Centre, Austria, pp. 89-100.

[۷] خودسیانی، رضا؛ (۱۳۸۲) آزمون‌های غیرمخرب، شرکت ملی گاز ایران، ص. ۵۲۱-۵۳۰.

[8] ASM Committee, (1989) ASM Handbook (Nondestructive Evaluation and Quality Control Vol 17), 9th ed, ASM International.

[۹] جواهری، م.؛ عباسی، م.؛ شامقلی، م.؛ ریاضی، س. م.؛ (۱۳۹۴) کنترل کیفیت غیرمخرب قطعات کربونیتورده شده با آزمون جریان گردابی: مطالعه موردی ارزیابی سختی قطعه پیستونی روی فنر سوپاپ. سومین کنفرانس بین المللی آزمون‌های غیرمخرب ایران، تهران، هتل المپیک.

[10] Camerini, C., Sacramento, R., Areiza, M. C., Rocha, A., Santos, R., Rebello, J. M., Pereira, G., (2015) Eddy current techniques for super duplex stainless steel characterization. J. Magnetism. Magnetic. Mater, 388, pp. 96-100.

[11] Kashefi M., Kahrobaee, S., (2013) Determination of Presence of Undesirable Carbides at Surface of Cast Iron Parts Using

#### ۵- منابع

[1] Tabrett, C. P., Sare, I. R., (1997). The Effect of Heat Treatment on the Abrasion Resistance of Alloy White Irons. Wear, 203-204, pp. 206-219.

[2] Fusheng, H., Shouguo, S., (2002). Study on the Structure and Properties of a Novel Mini-Sized High Cr Mill Balls. Wear, 253, pp. 640-649.

Turnee, F., Lavalli, J., Masounave., (1989). Matrix Microstructure Effect on the Abrasion Wear Resistance of High-Chromium White Cast Iron. J. Mater. Sci., 24, pp. 3021-3028.

[3] Dogan, O. N., Hawk, J. A., Larid, G., (1997) Solidification Structure and Abrasion Resistance of High Chromium White Irons. Metall. Mater. Trans. A., 28, pp. 1315-1328.

[4] J. Shull, P.; (2002) Nondestructive Evaluation Theory, Techniques and Applications, 2ed ed, Marcel Dekker, New York, pp. 261-280.

[5] Hellier, C. J., (2003). Handbook of nondestructive evaluation, 2ed ed McGraw-Hill Companies, New York, pp. 417-430.

- غیرمخرب جریان گردابی. پژوهش‌نامه ریخته‌گری، دوره ۱، شماره ۳، ص. ۱۴۹-۱۶۰
- [16] Bida, G. V., Nichipuruk, A. P., Tsarkova, T.P., (2001) Magnetic Properties of Steels After Quenching and Tempering I General Carbon Steels. Russ. J. Nondest. Test., 29 37, 3-25.
- [۱۷] جواهری، م؛ عباسی، م؛ ریاضی، س. م؛ عشقیان، ر؛ (۱۳۹۳) اثر دمای تمپر بر پاسخ آزمون غیرمخرب جریان گردابی. سومین کنفرانس بین المللی مواد مهندسی و متالورژی، تهران، دانشگاه شهید بهشتی
- Differential Eddy Current Technique. Mater. Sci. Tech., 29, pp. 990-994.
- [12] Konoplyuk, S., (2010) Estimation of Pearlite Fraction in Ductile Cast Irons by Eddy Current Method. NDT&E International, 43, pp. 360-364.
- [13] Khan, S. H., Ali F., Nusair, K. A., Iqbal, M .A., (2008) Pearlite Determination in Plain Carbon Steel by Eddy Current Method. J. Mater. Pro. Tech., 200, pp. 318-318.
- [14] Choteborsky R., (2013) Effect of Heat Treatment on the Microstructure, Hardness and Abrasive Wear Resistance of High Chromium Hardfacing. J. Agri. Eng. Res., 29, pp. 23-28.
- [۱۵] جواهری، م؛ عباسی؛ (۱۳۹۶) ارزیابی ریزساختار و سختی قطعات ریختگی عملیات حرارتی شده با آزمون

## Non-Destructive Evaluation of High Chromium Cast Iron Mill Balls with Eddy Current Test

Mojtaba Javahery<sup>1</sup>, Majid Abbasi<sup>\*2</sup>, Nima Azizi<sup>3</sup> and Seyed Mohamad Ali Boutorabi<sup>4</sup>

1- MSc. in Materials Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

2- Associate Professor, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

3- MSc. in Materials Engineering, Iran University of Industries and Mines, Tehran, Iran,

4- Professor, School of Metallurgy and Materials, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

\*abbasim@nit.ac.ir

### Abstract

In this paper, the eddy current nondestructive testing method was presented to evaluate the residual austenite in the microstructure and hardness of high chromium cast iron mill balls. For this purpose, some 40 mm high alloy cast iron balls with 30 wt.% Cr and 3 wt.% C nominal composition were selected after sand casting process. To achieve the different hardness and different residual austenite contents in the microstructure, the balls were heat treated at different austenitizing and tempering temperatures. The microstructural studies using by optical and scanning electron microscopies, XRD and Vickers hardness were performed on the samples. Then, the microstructures of the samples were evaluated using an eddy current device at 50 to 200 kHz frequencies. The result showed that, using the eddy current method, different microstructures of the balls with different values of residual austenite and hardness can be identified and separated, rapidly and nondestructively. To the purpose, the eddy current inspection at 150 kHz frequency is selected using the impedance index as a non-destructive evaluation method. This index decreases with increasing residual austenite content.

**Keywords:** Non-Destructive Evaluation, Eddy Current, High Chromium Cast Iron, Mill Balls, Residual Austenite

# شناسایی سریع محصول آلوده به سم آفت‌کش با روش‌های نوین فناوری آزمون غیرمخرب

بهاره جمشیدی

استادیار؛ مکانیک بیوسیستم، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی؛ سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی؛ کرج؛ ایران.  
b.jamshidi@areo.ac.ir

## چکیده

آفت‌کش‌ها یا سموم شیمیایی که برای کنترل آفت‌ها و بیماری‌های گیاهی استفاده میشوند، اگر چه سبب افزایش کارایی تولید محصول هستند، می‌توانند محیط زیست و مواد غذایی را آلوده کنند. استفاده بیش از حد و نادرست آفت‌کش‌ها در طول تولید، عدم توجه به دوره کارنس سموم، برداشت زود هنگام محصولات سم‌پاشی شده و ارائه آنها به بازار، و فروش این محصولات بلافاصله یا در مدت زمان کوتاهی پس از سم‌پاشی، منجر به افزایش باقی‌مانده سموم در آنها از حد مجاز می‌شود که مخاطرات جدی برای سلامت و ایمنی مصرف‌کننده در پی دارد. به منظور حفظ سلامت عمومی، شناسایی و تعیین آلودگی محصولات کشاورزی (به ویژه میوه‌ها و سبزی‌ها) به سموم آفت‌کش بسیار ضروری است. در حال حاضر برای اندازه‌گیری غلظت باقی‌مانده سموم، از روش‌های مخرب مختلفی استفاده می‌شود که بسیار پرهزینه و زمان‌بر هستند و نیاز به نیروی متخصص و آموزش‌دیده و آزمایشگاه‌های پیشرفته دارند. بنابراین، توسعه یک روش غیرمخرب سریع، ساده، کم‌هزینه، ناآلاینده و قابل اعتماد به منظور تشخیص باقی‌مانده سموم آفت‌کش بسیار ضروری است. در این مقاله، ضمن ارائه پیشرفت‌های نوین در فناوری آزمون غیرمخرب که می‌توانند برای شناسایی سریع محصول آلوده به سموم شیمیایی استفاده شوند، به معرفی سامانه نوین و قابل حمل طراحی شده برای این منظور مبتنی بر روش اپتیکی اسپکتروسکوپی فروسرخ نزدیک پرداخته شده است.

**واژگان کلیدی:** اسپکتروسکوپی، باقی‌مانده سم، تصویربرداری ابرطیفی، فناوری آزمون غیرمخرب، فروسرخ نزدیک.

## ۱- مقدمه

فناوری آزمون غیرمخرب<sup>۱</sup> (NDT) که فرایند ارزیابی، بازرسی و آزمون به منظور کنترل کیفیت و ایمنی مواد، محصولات، ترکیبات، قطعات و یا سازه‌ها و سامانه‌ها را شامل می‌شود؛ می‌تواند افزون بر تعیین یا تشخیص برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی، ناپیوستگی‌ها یا تغییرات ساختاری و تفاوت در ویژگی‌ها را بدون تخریب یا آسیب رسانی به نمونه موردبررسی، شناسایی کند. با پیشرفت دانش مهندسی، فناوری NDT توسعه قابل‌توجهی در حوزه‌های مختلف علم و صنعت داشته و کاربرد آن به منظور رفع مشکلات و چالش‌های اساسی در زمینه کیفیت‌سنجی مواد و محصولات بسیار مورد توجه جوامع علمی و دولت‌ها قرار گرفته است.

یکی از مسایل اصلی که به ویژه در سال‌های اخیر سبب نگرانی‌های سیاسی، اجتماعی و اقتصادی دولت‌ها شده است، آلودگی محصولات کشاورزی به سموم شیمیایی ازبین‌برنده آفت‌های گیاهی (آفت‌کش‌ها) است که به طور مستقیم روی سلامت مصرف‌کننده تاثیر دارد.

سم‌پاشی‌های مکرر، استفاده نابجا و بیش از حد آفت‌کش‌ها، به‌کارگیری سموم غیر مجاز، عدم توجه به دوره کارنس سموم، برداشت زود هنگام محصولات سم‌پاشی شده و ارائه آنها به بازار، و مصرف این محصولات در مدت زمان کوتاهی پس از سم‌پاشی، منجر به افزایش باقی‌مانده سموم از حد مجاز<sup>۲</sup> (MRL)، در آنها می‌شود که مخاطرات جدی برای مصرف‌کننده در پی دارد و سبب بروز بیماری‌های مختلف و خطرناک مانند انواع سرطان می‌شود. از این رو، شناسایی و تعیین باقی‌مانده سموم در محصولات کشاورزی (به ویژه میوه‌ها و سبزی‌ها که مصرف تازه‌خوری دارند) در راستای تضمین سلامت و ایمنی آنها بسیار حائز اهمیت است. در حال حاضر برای تعیین و اندازه‌گیری باقی‌مانده سموم، از روش‌های مخرب درون‌آزمایشگاهی و مشکلی استفاده می‌شود که بسیار پرهزینه و زمان‌بر هستند و ضمن نیاز به تجهیزات گران‌قیمت و نیروهای متخصص و آموزش‌دیده، به دلیل تخریب نمونه سالم، سبب افزایش ضایعات نیز می‌شوند. از سوی دیگر، در این روش‌ها تنها تعداد محدودی نمونه به

<sup>2</sup> Maximum Residue Limits

<sup>1</sup> Non-destructive Testing

طیف‌های NIR شامل اطلاعات فراوانی هستند ولی همیشه استخراج داده‌ها به طور مستقیم از طیف ممکن نیست. همچنین، طیف‌های NIR ممکن است به دلیل اثر پراکندگی، ناهمگن بودن بافت، نویز دستگاهی، اثرهای محیطی و غیره پیچیده‌تر شوند. بنابراین، روش‌های آماری چندمتغیره (شیمی‌سنجی<sup>۴</sup>) برای استخراج اطلاعات مفید از یک طیف NIR نیاز هستند. بنابراین در روش اسپکتروسکوپی NIR، از مدل‌سازی‌های چندمتغیره خطی یا غیر خطی به منظور بررسی امکان تخمین و پیش‌بینی یک ترکیب یا ویژگی درونی محصول با ایجاد یک برازش قابل اعتماد بین اطلاعات طیفی استخراج‌شده و غلظت ترکیب یا مقادیر ویژگی موردنظر که با روش‌های مرجع قابل اندازه‌گیری هستند، استفاده می‌شود. همچنین، از مدل‌های طبقه‌بند چندمتغیره خطی یا غیرخطی می‌توان برای بررسی توانایی روش در آنالیزهای کیفی محصول بر پایه اطلاعات طیفی بهره برد [3,4]. تجهیزات موردنیاز اسپکتروسکوپی NIR برای دریافت اطلاعات از یک نمونه جامد بدون نیاز به نمونه‌گیری شامل منبع نور، اسپکترومتر<sup>۴</sup> (تکفام‌ساز<sup>۵</sup> و آشکارساز<sup>۶</sup>) و فیبر نوری<sup>۷</sup> است. شکل ۱ نمونه‌ای از تجهیزات اسپکتروسکوپی NIR را که می‌تواند برای دریافت اطلاعات طیفی از درون یک نمونه جامد مانند محصول کشاورزی استفاده شود، نشان می‌دهد.



شکل (۱) نمونه‌ای از تجهیزات موردنیاز اسپکتروسکوپی NIR در سال‌های اخیر، اسپکتروسکوپی NIR نسبت به سایر روش‌های اپتیکی و غیراپتیکی به دلیل دارا بودن مزایایی از قبیل عدم نیاز به آماده‌سازی نمونه، هزینه نسبتاً پایین، سازگاری بیشتر با شرایط زیست-محیطی و سهولت

عنوان نماینده یک دسته محصول مورد ارزیابی قرار گرفته و نتیجه به کل دسته تعمیم داده می‌شود. با توجه به پیشرفت علم و فناوری و ظهور روش‌های نوین در فناوری NDT برای آنالیز مواد، توسعه یک روش ساده، سریع، کم‌هزینه و ناآلاینده به منظور ارزیابی غیرمخرب ایمنی محصولات از نظر آلودگی به سموم آفت‌کش (با امکان بررسی تک‌تک نمونه‌ها) و قابلیت کاربرد در هر محلی (مستقیماً در مزرعه، باغ، گلخانه یا میادین تره‌بار) بسیار حائز اهمیت است [1,2].

از بین روش‌های غیرمخرب، روش‌های نوین اپتیکی مبتنی بر طیف‌سنجی یا اسپکتروسکوپی، توانایی نمایش جزئیات ترکیبی و غذایی مواد و اندازه‌گیری ترکیبات مواد بیولوژیکی را دارا هستند و کاربرد ویژه‌ای در آنالیزهای کمی و کیفی مواد غذایی به ویژه کیفیت‌سنجی محصولات کشاورزی پیدا کرده‌اند. با این حال کاربرد این روش‌ها در تعیین میزان باقی‌مانده سموم محصولات کشاورزی و غذایی و ایمنی‌سنجی آنها به تازگی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این مقاله، ضمن معرفی دو روش اسپکتروسکوپی فروسرخ نزدیک<sup>۱</sup> (NIR) و تصویربرداری ابرطیفی<sup>۲</sup> به عنوان دو روش اپتیکی مهم در فناوری NDT که توانایی آنها برای تشخیص سریع باقی‌مانده سموم سطحی و نفوذ کرده به بافت برخی محصولات مورد تایید قرار گرفته است، به توضیح مشخصات و نحوه کار سامانه نوین و پرتابل طراحی‌شده برای این منظور مبتنی بر روش اسپکتروسکوپی مرئی/فروسرخ نزدیک (Vis/NIR) پرداخته شده است.

## ۲- اسپکتروسکوپی NIR

اسپکتروسکوپی NIR اغلب بر اساس طیفی‌های جذبی و در مورد برهم‌کنش تابش NIR با ماده بحث می‌کند. تابش NIR، بخشی از تابش فروسرخ (IR) است که در محدوده طول موجی ۷۸۰-۲۵۰۰ nm از طیف الکترومغناطیس، بلافاصله بعد از ناحیه مرئی قرار دارد. طیف NIR یک ترکیب می‌تواند اطلاعات مهمی در مورد ساختار مولکولی و طبیعت شیمیایی ماده ارائه کند. به گونه‌ای که، انرژی هر پیکی که روی طیف ظاهر می‌شود با فرکانس ارتعاشی قسمتی از مولکول مطابق است.

4 Chemometrics  
5 Spectrometer  
6 Monochromator  
7 Detector  
8 Optical Fiber

2 Near-Infrared  
3 Hyperspectral Imaging

شده است. این روش یک ابزار بسیار قوی برای جمع‌آوری اطلاعات طیفی و مکانی از یک شیء یا محصول در طول موج‌های پیوسته روی یک محدوده طیفی گسترده است. تصویربرداری ابرطیفی که ترکیبی از فناوری تصویربرداری و اسپکتروسکوپی است، می‌تواند ویژگی‌های ظاهری محصول را از تصویر استخراج و ویژگی‌های شیمیایی آن را به کمک آنالیزهای طیفی ارائه کند. تصاویر دریافت‌شده سه‌بعدی هستند و ابرمکعب نامیده می‌شوند به طوری که یک بعد مربوط به اطلاعات طیفی و دو بعد دیگر مربوط به اطلاعات مکانی است. همانند روش اسپکتروسکوپی NIR، از روش‌های شیمی‌سنجی به همراه پردازش تصویر برای دستیابی به اطلاعات مفید تصاویر ابرطیفی یک نمونه استفاده می‌شود. تجهیزات موردنیاز در تصویربرداری ابرطیفی معمولاً شامل منبع نور، اسپکتروگراف و لنز، و دوربین مناسب برای دریافت تصویر در طول موج‌های بازه تابشی موردنظر است.

تاکنون، پژوهش‌های اندکی که در خصوص کاربرد فناوری تصویربرداری ابرطیفی برای تخمین باقی‌مانده سموم در محصولات کشاورزی بدون تخریب محصول انجام شده، توانمندی آن را در شناسایی باقی‌مانده سم در سطح محصول تایید کرده‌است [14,15].

شکل ۳ شماتیکی از چیدمان تصویربرداری ابرطیفی Vis/NIR را نشان می‌دهد که برای تشخیص سم دیکلرووس<sup>۱</sup> روی سطح پرتقال ناول استفاده شده است [14]. شکل ۴ نیز دیاگرامی از استخراج داده‌های طیفی از تصاویر ابرطیفی Vis/NIR برگ‌های توت را به همراه طیف‌های بازتاب آنها و با هدف تشخیص باقی‌مانده سم کلرپیریفوس<sup>۲</sup>، نشان می‌دهد [15].

با توجه به گران‌قیمت بودن تجهیزات تصویربرداری ابرطیفی هم‌چنین حجم بالای اطلاعات و لزوم پردازش‌های سنگین در این روش، کاربرد این تصاویر بیش‌تر تحقیقاتی بوده و برای طراحی سامانه‌های پرتابل مناسب نیست.

به‌کارگیری در سامانه‌های درجه‌بندی و کنترل فرایند به منظور کیفیت‌سنجی محصولات کشاورزی و غذایی کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. از سوی دیگر، پیشرفت‌های اخیر فناوری در طراحی سخت‌افزار و روش‌های جمع‌آوری، پردازش و تحلیل داده، توانمندی این روش را دو چندان کرده است [5,6]. با این حال، تاکنون پژوهش‌های اندکی در خصوص کاربرد این روش برای تخمین باقی‌مانده سموم در محصولات کشاورزی بدون تخریب محصول (به ویژه در میوه‌ها و سبزی‌ها که مصرف تازه‌خوری دارند)، انجام شده ولی نتایج همه این پژوهش‌ها حاکی از توانمندی روش اسپکتروسکوپی NIR در شناسایی وجود باقی‌مانده سم در محصول بوده است [7,8,9,10,11,12,13]. از این رو، انتظار می‌رود که در آینده‌ای نزدیک این روش به منظور ارزیابی باقی‌مانده سموم در محصولات به جای روش‌های آزمایشگاهی زمان‌بر و پرهزینه‌ای که هم‌اکنون برای این منظور به‌کار می‌روند از قبیل کروماتوگرافی گازی<sup>۱</sup> (GC)، کروماتوگرافی مایع<sup>۲</sup> (HPLC)، طیف‌سنجی جرمی<sup>۳</sup> (MSD)، ترکیب کروماتوگرافی گازی یا مایع با طیف‌سنجی جرمی (GC/MS, LC/MS)، استفاده شود.

شکل ۲ نمونه‌ای از طیف‌های Vis/NIR خیارهای سالم و آلوده به غلظت‌های مختلف سم دیازینون<sup>۴</sup> را نشان می‌دهد. تفاوت‌های بارز این طیف‌ها در هر دو ناحیه طیف مرئی و NIR، اساس طراحی سامانه‌ای پرتابل برای تشخیص و تعیین غیرمخرب باقی‌مانده سم در محصول بوده که در بند ۴ مقاله به معرفی آن پرداخته شده است. مطابق شکل ۲، هرچه غلظت سم در محصول افزایش می‌یابد (از فاقد سم (AP) به دارای سم با غلظت‌های رو به افزایش (به ترتیب PP1، PP2 و PP3))، از مقدار جذب در ناحیه مرئی کاسته و به مقدار جذب در ناحیه NIR افزوده می‌شود.

### ۳- تصویربرداری ابرطیفی

تصویربرداری ابرطیفی به عنوان یکی از فناوری‌های تصویربرداری اپتیکی که در سال‌های اخیر رایج شده‌اند، در کاربردهای کشاورزی و غذایی به طور گسترده استفاده

<sup>1</sup> Gas Chromatography

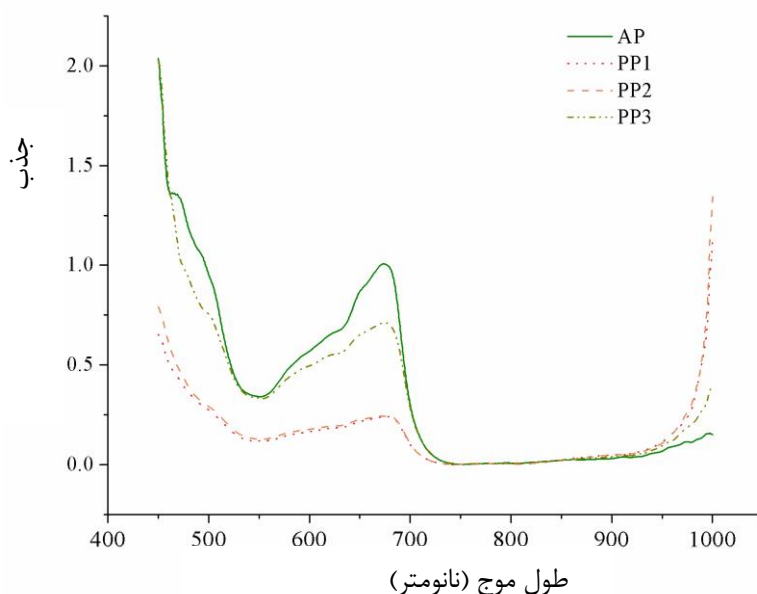
<sup>2</sup> Liquid Chromatography

<sup>3</sup> Mass Spectrometry

<sup>4</sup> Diazinon

<sup>1</sup> Dichlorvos

<sup>2</sup> Chlorpyrifos

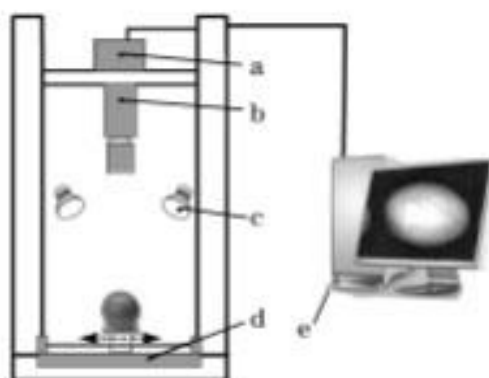


شکل (۲) میانگین طیف‌های Vis/NIR جذبی نمونه‌های خیار فاقد و دارای سم با غلظت‌های متفاوت

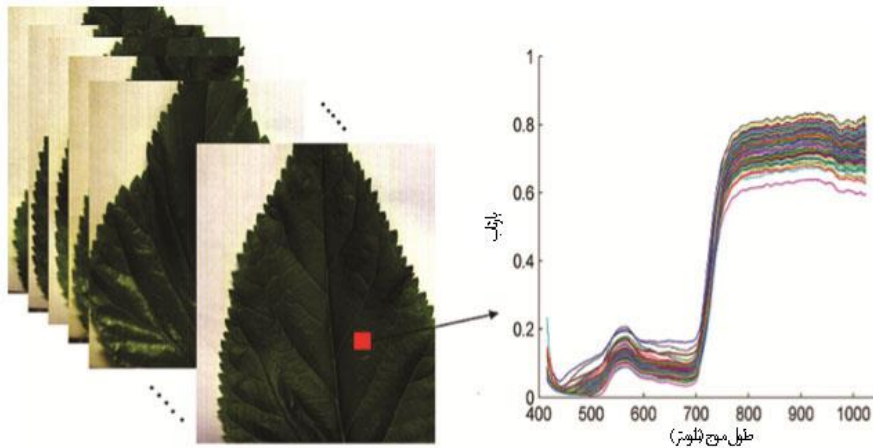
همچنین افزایش قدرت تفکیک طیفی برای دستیابی به اطلاعات جزئی‌تر (بیش‌تر) و مدل‌سازی‌های چندمتغیره خطی به منظور پیش‌بینی مقدار باقی‌مانده و الگوریتم‌های بازشناسی الگو برای طبقه‌بندی نمونه‌های آلوده از سالم (بر اساس دارا بودن یا نبودن باقی‌مانده سم طبق حد مجاز (MRL)) است. هسته اصلی نرم‌افزار این سامانه نیز مبتنی بر مدل‌های تدوین‌شده برای شناسایی و تعیین مقدار سم عمل کرده و نتایج بررسی را در بخش رابط گرافیکی کاربر نمایش می‌دهد.

#### ۴- سامانه نوین تشخیص سریع و غیرمخرب باقی‌مانده سموم

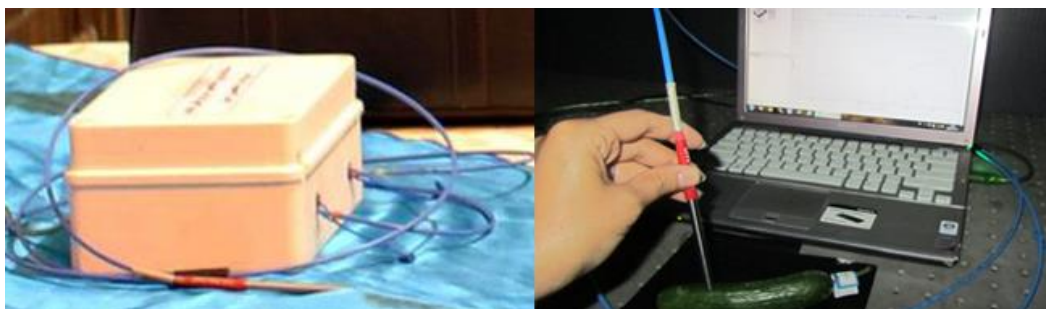
سامانه اپتیکی طراحی و ارائه‌شده برای تشخیص و تعیین سریع و غیرمخرب باقی‌مانده سموم در محصولات کشاورزی (شکل ۵) مبتنی بر روش اسپکتروسکوپی Vis/NIR (با طراحی چیدمان اپتیکی مناسب برای دریافت اطلاعات طیفی از درون محصول با دقت و حساسیت بالا) و به‌کارگیری روش‌های شیمی‌سنجی مناسب به منظور پیش‌پردازش‌های طیفی ترکیبی (برای هموارسازی و حذف نویز، نرمال‌سازی و حذف اثرات فیزیکی طیف‌ها ناشی از پخش نور، اندازه محصول و غیره



شکل (۳) شماتیکی از چیدمان تصویربرداری ابرطیفی Vis/NIR: a: دوربین CMOS، b: اسپکتروگراف و لنز، c: منابع نور هالوژن، d: تسمه نقاله، e: رایانه [14]



شکل (۴) دیاگرام استخراج داده‌های طیفی و منحنی طیف بازتاب Vis/NIR برگ‌های توت [15]



شکل (۵) سامانه اپتیکی طراحی شده برای تشخیص و تعیین سریع و غیرمخرب باقی‌مانده سم در محصول مبتنی بر روش اسپکتروسکوپی Vis/NIR

ب- مدل‌های تشخیص و تعیین باقی‌مانده سم از دیگر بخش‌های اصلی این سامانه هستند که برای یک جامعه آماری کامل از نمونه‌ها با غلظت‌های مختلف سم و بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده به روش‌های مرسوم شیمیایی، تدوین و اعتبارسنجی شده‌اند. برای این منظور بررسی فیزیکی طیف‌های Vis/NIR نمونه‌ها و سم به منظور تعیین نواحی موثر در تشخیص، انجام و بهترین شیوه ترکیبی پیش‌پردازش برای دستیابی به مدل‌های دقیق، مدل طبقه‌بندی نمونه‌های آلوده از سالم مبتنی بر اطلاعات طیفی Vis/NIR آنها و بر اساس دارا بودن یا نبودن باقی‌مانده (بیش‌تر یا کم‌تر بودن مقدار سم از حد مجاز MRL) با کم‌ترین خطای استاندارد و بیش‌ترین دقت طبقه‌بندی به دست آمد. هم‌چنین، بهترین مدل پیش‌بینی‌کننده مقدار باقی‌مانده سم مبتنی بر اطلاعات طیفی Vis/NIR محصول و مقدار سم اندازه‌گیری شده به روش مرجع مرسوم نیز تعیین شد.

ج- نرم‌افزار سامانه دارای یک هسته اصلی است که مبتنی بر مدل‌های طبقه‌بندی و پیش‌بینی‌کننده

#### ۱-۴- بخش‌های اصلی سامانه

سامانه پرتابل طراحی شده ترکیب سخت‌افزار و نرم‌افزار و شامل سه بخش اساسی است:

الف- بخش سنجش طیفی و اسپکتروسکوپی Vis/NIR شامل مجموعه منبع نور، تکفام‌ساز، آشکارساز و فیبرهای نوری در بدنه اصلی سامانه به صورت یک مجموعه واحد با چیدمان مناسب (برای جلوگیری از ایجاد اثرات ناخواسته شامل نویزهای دستگاهی و حرارتی) برای سنجش طیفی از نواحی مختلف محصول به منظور دریافت اطلاعات درونی و نفوذ کرده به آن، بدون تاثیرپذیری از بازتاب‌های سطحی، طراحی شده است. انتخاب اجزای این بخش و طراحی چیدمان قرارگیری آنها به گونه‌ای انجام شده که سامانه دارای ابعاد کم بوده و ضمن سبک و پرتابل بودن، توانایی دریافت اطلاعات طیفی درونی محصول را بدون هیچ‌گونه تماس یا آسیب‌رسانی به آن داشته باشد و واسنجی اولیه آن به منظور حذف اثرات نور محیطی به راحتی امکان‌پذیر باشد.

سطح احتمال ۵ درصد وجود نداشت ( $P > 0.05$ ). از این رو و با توجه به این که ماتریس محصول خیار مشابه حداقل ۵۰ محصول دیگر است و به دلیل قابلیت‌های روش اندازه‌گیری اپتیکی به کار گرفته شده و نرم‌افزار طراحی شده، سامانه مذکور قابل تعمیم برای تشخیص سایر سموم در محصولات کشاورزی (که امکان تدوین مدل‌های مناسب آنها وجود داشته باشد) است.

#### ۳-۴- مزایای سامانه

سامانه پرتابل طراحی شده قادر است بدون نیاز به عصاره‌گیری و هیچ‌گونه آسیب‌رسانی به محصول (به صورت کاملاً غیرمخرب) به سادگی توسط افراد غیر متخصص حتی در خارج از آزمایشگاه (مستقیماً در مزارع، گلخانه‌ها، میادین تره‌بار و غیره) به منظور تشخیص و تعیین سریع باقی‌مانده سم در محصولات کشاورزی به کار گرفته شود (زمان لازم برای بررسی، کسری از ثانیه است). با توجه به سریع و غیرمخرب بودن اندازه‌گیری با سامانه طراحی شده، این سامانه می‌تواند برای بررسی تعداد زیادی نمونه (محصول) در زمان بسیار کوتاه به کار گرفته شود و به دلیل پایین بودن هزینه سیستم نسبت به روش‌ها و دستگاه‌هایی که هم‌اکنون برای اندازه‌گیری باقی‌مانده سموم استفاده می‌شوند، سامانه طراحی شده کاملاً از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است.

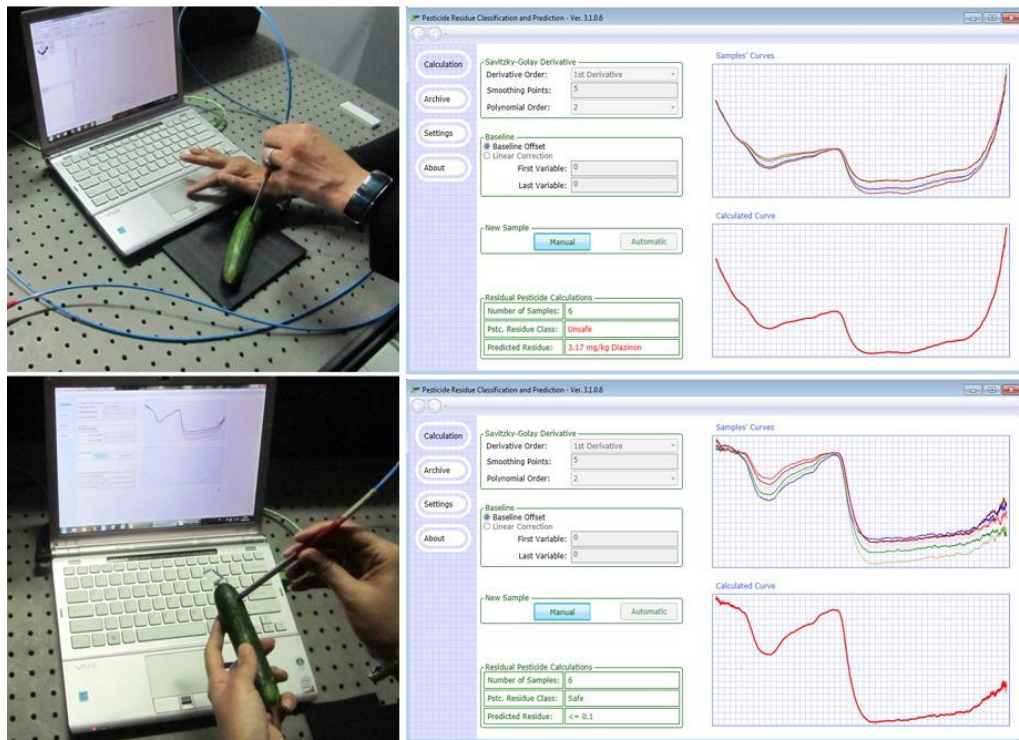
تدوین شده، به گونه‌ای نوشته شده که ضمن انجام محاسبات طیفی لازم، تعیین محدوده طیفی، تبدیل اطلاعات بازتاب درونی به جذب (متناسب با غلظت ترکیبات درونی)، میانگین‌گیری طیف‌ها، پیش‌پردازش‌های لازم مبتنی بر بهترین مدل‌های تدوین شده را انجام می‌دهد و نتیجه بررسی به همراه طیف‌های اخذ شده و طیف شاخص هر نمونه در بخش رابط گرافیکی کاربر قابل مشاهده است. شکل ۶، نمایشی از ارائه نتیجه بررسی نمونه‌های سالم و آلوده را توسط نرم‌افزار سامانه نشان می‌دهد.

#### ۲-۴- ارزیابی سامانه

مجموعه این سامانه با مطالعه موردی روی سم دیازینون در محصول خیار برای کنترل سریع و غیرمخرب ایمنی نمونه‌های خیار بر اساس دارا بودن یا نبودن باقی‌مانده سم و تعیین مقدار آن سازگار و با اندازه‌گیری‌های مرجع یک مرکز دارای مجوز تعیین باقی‌مانده سموم با روش‌های دستگاهی مرسوم، واسنجی شده است. بر اساس نتایج ارزیابی عملکرد، دقت کل سامانه در شناسایی طبقه نمونه‌ها (سالم یا آلوده) ۹۲/۳۱ درصد بود. طبق نتایج آزمون  $t$  زوجی ارائه شده در جدول (۱)، بین مقدارهای پیش‌بینی شده سم با سامانه و اندازه‌گیری شده با دستگاه GC (روش آزمایشگاهی مرسوم)، اختلاف معنی‌داری در

جدول (۱) نتایج آزمون  $t$  زوجی بین مقادیر پیش‌بینی شده با سامانه طراحی شده و اندازه‌گیری شده با دستگاه GC

میانگین	انحراف استاندارد (SD)	خطای استاندارد میانگین
۸/۳۹	۹/۳۲	۲/۲۶
۷/۳۶	۶/۰۹	۱/۴۸
۱/۰۳	۴/۶۷	۱/۱۳
(P) = ۰/۳۷۵ مقدار احتمال		



شکل (۶) نتیجه بررسی یک نمونه خیار آلوده (بالا) و یک نمونه خیار سالم (پایین) توسط سامانه و نرم افزار طراحی شده آن

## ۵- نتیجه گیری

روش های نوین اپتیکی در فناوری آزمون غیرمخرب شامل اسپکتروسکوپی NIR و تصویربرداری ابرطیفی می توانند به منظور اندازه گیری سریع و غیرمخرب باقی مانده سموم در محصول استفاده شوند که اسپکتروسکوپی NIR نسبت به تصویربرداری ابرطیفی بسیار مقرون به صرفه، کاربردی تر و استفاده از آن برای طراحی سامانه های پرتابل یا برخط عملی تر است. سامانه اپتیکی پرتابل طراحی شده مبتنی بر روش اسپکتروسکوپی Vis/NIR که برای کنترل سریع و غیرمخرب ایمنی نمونه های خیار بر اساس دارا بودن یا نبودن باقی مانده سم و تعیین مقدار آن سازگار شده، قادر به شناسایی و تفکیک محصولات فاقد و دارای باقی مانده سم با دقت بالای ۹۰ درصد است. به این ترتیب، سامانه مذکور می تواند به منظور غربالگری اولیه محصول بر اساس دارا بودن یا نبودن باقیمانده سم به صورت سریع و غیرمخرب در هر محلی به کار گرفته شود.

## ۶- منابع

- برای تشخیص سریع و غیرمخرب باقی مانده سموم در محصولات کشاورزی. مجموعه مقالات بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، شیراز، جلد ۲۰، ص ۱۲۵-۱۲۸.
- [2] جمشیدی، ب؛ مهاجرانی، ع؛ جمشیدی، ج؛ مینایی، س؛ شریفی، ا. (۱۳۹۳) اندازه گیری غیرمخرب باقی مانده سموم در محصولات کشاورزی با اسپکتروسکوپی Vis/NIR و روش های شیمی سنجی. مجموعه مقالات بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، تهران، جلد ۲۱، ص ۷۳-۷۶.
- [3] جمشیدی، ب؛ مینایی، س؛ مهاجرانی، ع؛ قاسمیان، ح. (۱۳۹۳) بررسی اثر پیش پردازش های مختلف طیفی بر پیش بینی غیرمخرب کیفیت پرتقال با اسپکتروفتومتری فروسرخ نزدیک (NIRS). مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۱۵، شماره ۲، ص ۲۷-۴۴.
- [4] جمشیدی، ب؛ مینایی، س؛ مهاجرانی، ع؛ قاسمیان، ح. (۱۳۹۴) بازشناسی الگوی اسپکتروسکوپی فروسرخ نزدیک برای تفکیک غیرمخرب پرتقال ها بر اساس شاخص مزه. نشریه ماشین های کشاورزی، جلد ۵، شماره ۱، ص ۱۱۰-۱۰۱.
- [5] Jamshidi, B., Minaei, S., Mohajerani, E., Ghassemian, H. (2012). Reflectance Vis/NIR spectroscopy for nondestructive taste characterization of Valencia oranges. Computers and Electronics in Agriculture, 85, 64-69.

[1] جمشیدی، ب؛ مهاجرانی، ع؛ مینایی، س؛ جمشیدی، ج؛ شریفی، ا. (۱۳۹۲) بررسی فیزیکی توانایی اسپکتروسکوپی

- [11] Saranwong, S., Kawano, S. (2005). Rapid determination of fungicide contaminated on tomato surfaces using the DESIR-NIR: A system for ppm-order concentration. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 13, 169-175.
- [12] Teye, E., Huang, X., Afoakwa, N. (2013). Review on the potential use of near infrared spectroscopy (NIRS) for the measurement of chemical residues in food. *American Journal of Food Science and Technology*, 1(1), 1-8.
- [13] Xue, L., Cai, J., Li, Jing, Liu, M. (2012). Application of particle swarm optimization (PSO) algorithm to determine dichlorvos residue on the surface of navel orange with Vis-NIR spectroscopy. *Procedia Engineering*, 29, 4124-4128.
- [14] Li, J., Xue, L., Liu, M., Wang, X., Luo, C. (2010). Hyperspectral imaging technology for determination of dichlorvos residue on the surface of navel orange. *Chinese Optics Letters*, 8(11), 1050-1052.
- [15] Sun, J., Jiang, S., Zhang, M., Mao, H., Wu, X., Li, Q. (2016). Detection of pesticide residues in mulberry leaves using Vis-NIR hyperspectral imaging technology. *Journal of Residuals Science and Technology*, 13, S125-S131.
- [6] Jamshidi, B., Minaei, S., Mohajerani, E., Ghassemian, H. (2014). Prediction of soluble solids in oranges using visible/near-infrared spectroscopy: Effect of peel. *International Journal of Food Properties*, 17, 1460-1468.
- [7] Jamshidi, B., Mohajerani, E., Jamshidi, J. (2016). Developing a Vis/NIR spectroscopic system for fast and non-destructive pesticide residue monitoring in agricultural product. *Measurement*, 89, 1-6.
- [8] Jamshidi, B., Mohajerani, E., Jamshidi, J., Minaei, S., Sharifi, A. (2015). Non-destructive detection of pesticide residues in cucumber using visible/near-infrared spectroscopy. *Food Additives & Contaminants-Part A*, 32(6), 857-863.
- [9] Salguero-Chaparro, L., Gaitán-Jurado, A. J., Ortiz-Somovilla, V., Peña-Rodríguez, F. (2013). Feasibility of using NIR spectroscopy to detect herbicide residues in intact olives. *Food Control*, 30, 504-509.
- [10] Sánchez, M.T., Flores-Rojas, K., Guerrero, J. E., Garrido-Varo, A., Pérez-Marín, D. (2010). Measurement of pesticide residues in peppers by near-infrared reflectance spectroscopy. *Pest Management Science*, 66, 580-586.

## Rapid detection of pesticide-contaminated product using novel methods of NDT Technology

**Bahareh Jamshidi**

Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. b.jamshidi@areeo.ac.ir

### Abstract

Although pesticides which are used to control plant pests and diseases increase the productivity, they have the potential to contaminate the environment and foods. By using pesticides excessively or incorrectly during production, ignoring the degradation period of pesticides and early harvesting, transferring to the market and selling the products immediately or a few days after spraying, the pesticides residue will exceed the maximum residue limits, thus indicating a potential risk to consumer health and safety. To ensure public health, it is essential to detect and determine pesticides contamination of agricultural products especially fruits and vegetables. Currently, several different destructive technologies are used to determine the concentration of pesticides residue which are destructive, have a highly time-consuming sample preparation, are very expensive, and require well-trained personnel and advanced laboratories. Therefore, development of a non-destructive, fast, simple, low-cost, environmentally friendly and reliable detection technique of pesticides residue is imperative. In this paper, some advances in non-destructive testing technology which can use for rapid detection of pesticides-contaminated product are presented and a novel portable system designed based on visible/near-infrared spectroscopy is introduced for this end.

**Keywords:** Hyperspectral Imaging, NDT Technology, NIR, Pesticide Residue, Spectroscopy.

## تقویم رویدادهای آزمون‌های غیرمخرب

Event	Venue	Date
12 <sup>th</sup> European conference on Non-Destructive Testing	Gothenburg, Sweden	11-15 June 2018
Far East NDT New Technology & Application Forum	Xiamen, China	6-8 July 2018
6 <sup>th</sup> Japan-US NDT Symposium: Emerging NDE Capabilities for a Safer World	Oahu, Hawaii, USA	8-11 July 2018
45 <sup>th</sup> Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation	Burlington, VT	16-19 July 2018
Digital Imaging and Ultrasonics for NDT 2018	Mashantucket, USA	24-26 July 2018
57 <sup>th</sup> Annual British Conference on Non-Destructive Testing	Nottingham, UK	10-12 Sep.2018
15 <sup>th</sup> International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies	Nottingham, UK	10-12 Sep 2018
1 <sup>st</sup> Gulf Non-Destructive Testing Expo 2018 (GNDDT EXPO 2018)	Dubai, UAE	25-27 Sep 2018
1 <sup>st</sup> International Conference on Welding & Non Destructive Testing 2018	Athene, Greece	22-23 Oct 2018
ASNT Annual Conference 2018	Houston, USA	28-31 Oct 2018
5 <sup>th</sup> Iranian International NDT Conference (IRNDDT 2018)	Tehran, Iran	4-5 Nov 2018
48 <sup>th</sup> NDE for Safety - Defektoskopie 2018	Prague, Czech Republic	6-8 Nov 2018
Pan-American Conference for Nondestructive Testing (PANDDT VI)	Mexico City, Mexico	20-25 Oct 2019
WCNDDT 2020 SEOUL - 20 <sup>th</sup> world Conference on Non-Destructive Testing	Coex, Seoul, Korea	8-12 June 2020

# پنجمین کنفرانس بین المللی آزمون های غیرمخرب ایران



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

The 5th Iranian International NDT Conference

Olympic Hotel, Tehran-Iran, November 4-5, 2018

۱۳ و ۱۴ آبان ماه ۱۳۹۷ - هتل المپیک - تهران

IRNDT 2018



www.irndt2018.ir

