

In-Line Inspection (ILI) Methods of Pipelines

Hadi Ebrahim Fathabadi^{id} | Mohammad Ghorbani^{id}✉

Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: ghorbani@sharif.edu

Article Information:

Research Article

Received 20 January 2023

Revised 14 February 2023

Accepted 17 Feb. 2023

Keywords:

Magnetic Flux Leakage (MFL),
Eddy Current (EC),
Ultrasonic Testing (UT),
Acoustic Emission (AE),
Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT)

ABSTRACT

Various destructive and nondestructive methods are used for in line inspection of pipelines. A pipe may fail because of different causes such as corrosion, pitting, stress corrosion cracking (SCC), weld cracks and mechanical impacts and damages. Corrosion failures in a pipe can take place in different ways, some of them are easy to detect and others require special facilities and methods. The best selection of the inspection tools depends on the type of application, mechanism of corrosion, chemical environment and the material. This paper investigates and compares different types of in-line inspection tools for pipelines and compare their advantages and disadvantages. Today, the most common method for In Line Inspection of pipelines is Magnetic Flux Leakage (MFL), which is used for detection of wall thickness reduction of pipelines, various cracks, corrosion and pitting in pipes. Therefore, it can't be applied for nonmagnetic materials. The Eddy Current (EC) test is a non-contact test with relatively low velocity which is sensitive to the stand off from the material surface during the test and it is used only for conductive materials. Ultrasonic testing is a common method with high accuracy. It is widely used for detection of different defects and is based on sending short wavelength high frequency ultrasonic waves into the material and receiving their reflections. By interpreting the results, various defects and reduction in the wall thickness of the pipes can be detected. Acoustic Emission (AE) testing, which is based on interpretation of elastic deformations, elastic strain energy changes and stress distribution, is not considered as a common test for inspection of pipelines, yet. Electromagnetic Acoustic Transducers (EMAT) are a new type of ultrasonic testing method which do not require liquid coupling but should be used at a definite distance from the pipe wall during the test. It is concluded that the fastest and most reliable method for In-Line Inspection (ILI) of pipelines is currently the Magnetic Flux Leakage (MFL) method.

Cite this article: Ebrahim Fathabadi. H. & Ghorbani. M. (2023). In-Line Inspection (ILI) Methods of Pipelines. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (2), 84-92. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2023.386037.1110>

بررسی روش‌های بازرسی درون خطی خطوط لوله

هادی ابراهیم فتح آبادی | محمد قربانی ✉

دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، رایانامه: ghorbani@sharif.edu

چکیده:

روش‌های متنوع آزمون‌های مخرب و غیرمخرب در ارزیابی‌های درون خطی خطوط لوله استفاده می‌شوند. یک خط لوله در حال استفاده توسط علل مختلفی مانند خوردگی، حفره دار شدن، ترک خوردگی تنشی، ترک جوش‌ها و ضربه‌های مکانیکی، ممکن است دچار آسیب شود. تخریب‌های خوردگی در یک خط لوله به صورت‌های گوناگونی رخ می‌دهد که بعضی نسبتاً به سادگی قابل تشخیص هستند و تشخیص برخی دیگر نیازمند ادوات و روش‌های خاص می‌باشد. انتخاب بهترین وسیله بازرسی اغلب به نوع کاربرد، نوع مکانیزم خوردگی، محیط شیمیایی موجود و جنس لوله بستگی دارد. این مقاله روشهای مختلف مورد استفاده در تجهیزات بازرسی درون خطی خطوط لوله و مزایا و معایب هر روش را بررسی و مقایسه کرده است. در حال حاضر روش نشر شار مغناطیسی، رایج‌ترین روش مورد استفاده در بازرسی درون خطی خطوط لوله است که برای تشخیص کاهش ضخامت خط لوله، انواع ترک در خط لوله و نیز برای انواع خوردگی و حفره دار شدن به کار می‌رود. لذا این روش برای موادی که مغناطیده نمی‌شوند، کاربرد ندارد. آزمون جریان گردابی یک آزمون غیر تماسی و با سرعت نسبتاً پایین است که به حفظ فاصله از سطح جسم در هنگام آزمون حساس است و فقط در مواد رسانا کاربرد دارد. آزمون فراصوتی روشی رایج و با دقت بالاست و استفاده گسترده‌ای در تشخیص انواع عیوب دارد که در آن از ارسال امواج فرا صوت با طول موج کوتاه و فرکانس بالا به داخل جسم و دریافت پالس‌های برگشتی و تفسیر آنها، برای تشخیص عیوب و اندازه گیری ضخامت استفاده می‌شود. نشر آوایی که بر مبنای تفسیر تغییر شکل الاستیک و انرژی کرنشی الاستیک و توزیع تنش پس از اعمال نیرو به جسم است، هنوز به عنوان یک فناوری رایج در بازرسی خطوط لوله مطرح نیست. استفاده از ترا گذارهای صوتی الکترومغناطیسی نوعی روش نوین فراصوتی است که نیازی به استفاده از واسط ندارد؛ اما حفظ فاصله‌ی مشخص از دیواره در زمان انجام آزمون دارای اهمیت است. نتایج بررسی‌ها نشان داد که سریع‌ترین و قابل اطمینان‌ترین روش برای تشخیص عیوب در خطوط لوله، روش نشر شار مغناطیسی است.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۱۰/۲۰

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۱/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۱۱/۲۸

کلیدواژگان:

نشت شار مغناطیسی،

جریان گردابی،

فراصوتی،

نشر آوایی،

ترا گذارهای صوتی

الکترومغناطیسی

استناد: ابراهیم فتح آبادی، هادی و قربانی، محمد. (۱۴۰۱). بررسی روش‌های بازرسی درون خطی خطوط لوله. *مجله فناوری آزمون‌های*

غیرمخرب، ۳ (۲)، ۸۴-۹۲. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2023.386037.1110>

۱- مقدمه

باشد تمامی شار مغناطیسی توسط سنسور دریافت می‌شود و در صورت وجود عیب در لوله، راستای شار مغناطیسی و مقدار آن تغییر خواهد کرد که قابل اندازه‌گیری است. تفسیر نتایج، از مقایسه نتایج بدست آمده از آزمون، با نتایج آزمون‌های انجام شده با قطعات استاندارد حاصل می‌شود.

برخی از مزایای این روش به شرح ذیل است :

- قدرت ارزیابی با کیفیت‌های متفاوت (تعداد سنسورهای مورد استفاده، دقت ارزیابی را مشخص خواهد کرد).

- از آنجایی که امواج مغناطیسی در تغییر شکل‌های پلاستیکی تغییر می‌کنند، آسیب‌های مکانیکی را می‌توان با این روش مشخص کرد.

- برای تشخیص کاهش ضخامت خط لوله، انواع ترک در خط لوله، و نیز برای انواع خوردگی و حفره دار شدن به کار می‌رود.

برخی از معایب این روش به شرح ذیل است :

- فقط برای مواد فرومغناطیس کاربرد دارد.

- از آنجا که اکسید آهن یک ماده غیر فرومغناطیس است، در صورت تجمع اکسید آهن در درون خط لوله، حساسیت این روش در تشخیص عیب کاهش می‌یابد.

- حجم داده‌های بدست آمده زیاد و تفسیر مشکل است.

- نیاز به مغناطیسی کردن دائمی خط لوله

- محدودیت عبور جریان سیال در هنگام پیگرانی

- برای مشخص کردن عیوب در جهات مختلف، خط لوله باید در جهات مختلف مغناطیده شود.

- برای خطوط لوله با قطر پایین کاربرد ندارد [۴-۷].

از پیشرفت‌های اخیر در خصوص نشت شار مغناطیسی، انجام آن بر اساس مدل دوقطبی مغناطیسی^۲ بعدی است [۸] که اثر اندازه و جهت عیوب و فاصله عیب، با توجه به قدرت مغناطیدن، سرعت آزمون، زبری سطح، تنش، ساختار مغناطیس کننده و با استفاده از شکل امواج و سیگنال‌های مختلف تحریک، قابل تحلیل است. همچنین برای کمی‌سازی نتایج، الگوریتم‌های بر پایه الگوریتم یادگیری ماشین و بر پایه الگوریتم تکرار استفاده شده است [۹].

در ارزیابی خطوط لوله روش‌های مختلف آزمون‌های مخرب و غیر مخرب کاربرد دارند. آزمون‌های مخرب از جمله آزمون هیدرواستاتیک، قبل از قراردادن خطوط لوله در سرویس و یا پس از انجام تعمیرات بر روی آن استفاده می‌شوند و در این آزمون‌ها، نوع و محل عیب بطور دقیق مشخص نمی‌شود، اما مقاوم بودن خط لوله در یک محدوده فشار عملیاتی مطمئن را می‌توان ارزیابی نمود. روش‌های آزمون غیرمخرب نیز بسیار متنوع می‌باشند. نوع روش انتخابی بستگی به کیفیت ارزیابی مورد نیاز، نوع عیوب، جنس ماده، در نظر گرفتن هزینه و ... خواهد داشت، اما آنچه مسلم است این است که یک روش بازرسی برای مشخص کردن تمامی انواع عیوب مناسب نخواهد بود و برای ارزیابی کامل خط لوله باید از ترکیب روش‌های مختلف استفاده نمود [۱-۶].

توپک‌ها یا پیگ‌ها وسایلی هستند که درون خط لوله قرار گرفته و در طول آن با استفاده از فشار سیال به حرکت در می‌آیند، به این عملیات توپک رانی^۱ می‌گویند. توپک‌رانی یکی از مراحل عملیاتی انجام گرفته جهت بهره‌برداری، نگهداری و حفاظت از خطوط لوله می‌باشد. لازم بذکر است انواع مختلف تجهیزات آزمون‌های غیر مخرب امکان قرارگیری بر روی این توپک‌ها را خواهند داشت و بدین‌وسیله امکان بازرسی درون خطی خطوط لوله مهیا می‌گردد.

هدف از این مقاله بررسی انواع روش‌های مورد استفاده در ادوات بازرسی درون خطی خطوط لوله، نحوه انجام، بیان خصوصیات و اساس کار هر یک و مقایسه آنها با یکدیگر می‌باشد.

۲- نشت شار مغناطیسی^۲

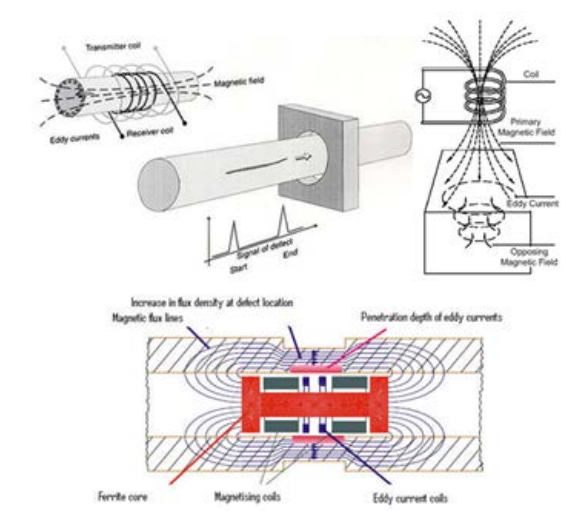
این روش رایج ترین روش مورد استفاده در ادوات بازرسی درون خطی خطوط لوله است. اساس کار بر مبنای اعمال یک میدان مغناطیسی قوی به دیواره خط لوله و استفاده از سنسورهای حساس برای تشخیص محل عیوب، با توجه به محل نشت شار مغناطیسی از سطح جسم فرومغناطیس می‌باشد (شکل ۱). در صورتی که سطح جسم بدون عیب

^۲ Magnetic Flux Leakage (MFL)

^۱ Pigging

- اجرای روش به حفظ فاصله تا سطح جسم حساس است [۱۱و۱۰].

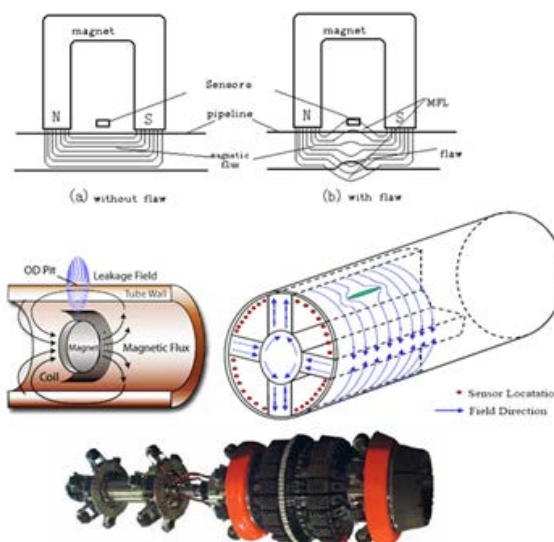
در سال‌های اخیر پیشرفت‌هایی در زمینه ارتقاء پروب با هسته هوا و پروب بزرگ مقاومت مغناطیسی^۲، استفاده از میدان چرخشی و اندازه‌گیری پارامترهای کنترل بهینه آزمون در اندازه‌گیری ترک‌های کوچک و عیوب در لوله‌ها و صفحات صورت پذیرفته است. لازم بذکر است که پروب با هسته هوا در خصوص شناسایی ترک‌های کوچک حساسیت کمی دارد که این مشکل با استفاده از پروب بزرگ مقاومت مغناطیسی مرتفع گردیده است [۱۲].



شکل ۲- آزمون جریان گردابی که در آن تغییرات ایجاد شده در امپدانس (مقاومت الکتریکی) پیچه، به علت وجود عیب، مبنای تشخیص عیوب است [۱۱].

۴- فراصوتی^۳

در این روش از ارسال امواج فراصوت با طول موج کوتاه و فرکانس بالا به داخل جسم و دریافت پالس‌های برگشتی و تفسیر آنها، برای تشخیص عیوب و اندازه‌گیری ضخامت استفاده می‌شود. ابزار فراصوتی نتایج را با دقت بسیار خوب ارائه می‌دهند. این روش برای مشخص کردن ترک‌های ناشی از خوردگی بسیار کاربرد دارد و نیز انواع دیگر عیوب از جمله کاهش ضخامت داخلی و خارجی، ناخالصی‌های فلزی و غیرفلزی، عیوب جوش‌ها و ... را می‌توان شناسایی کرد. این



شکل ۱- آزمون نشت شار مغناطیسی که در آن محل عیوب، با توجه به محل نشت شار مغناطیسی از سطح جسم فرومغناطیس مشخص می‌گردد [۷].

۳- جریان گردابی^۱

این روش یک روش الکترومغناطیسی است که فقط در مواد رسانا کاربرد دارد و انواع عیوب را در اندازه‌های متفاوت شناسایی می‌کند. این روش در صنایع هوافضا، اتومبیل‌سازی و صنایع دریایی کاربرد فراوان دارد. وقتی یک پیچه دارای انرژی الکتریکی به سطح یک رسانا نزدیک شود، جریانهای گردابی الکتریکی در جسم القاء می‌شوند. این جریانها، میدانهای مغناطیسی در جسم ایجاد می‌کنند که با میدان مغناطیسی ناشی از جریان‌های الکتریکی اولیه مخالفت می‌کنند. تغییرات ایجاد شده در امپدانس (مقاومت الکتریکی) پیچه، به علت وجود عیب، مبنای تشخیص عیوب است (شکل ۲).

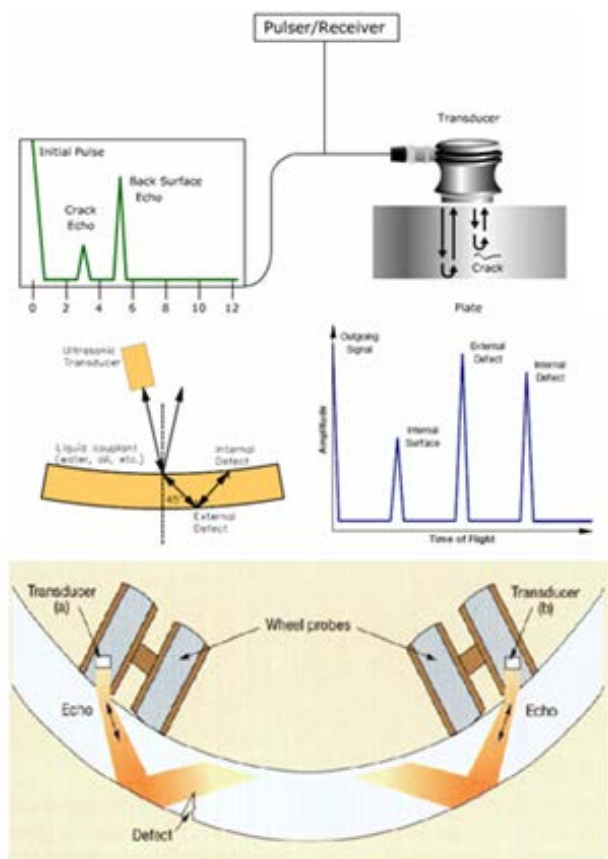
برخی از مزایای این روش به شرح ذیل است :

- آزمون غیر تماسی است.
- پس از آزمون نیاز به تمیز کاری ندارد.
- جریانهای القاء شده توسط روش نشت شار مغناطیسی با سنسورهای روش جریان گردابی قابل شناسایی هستند.
- برخی از معایب این روش به شرح ذیل است :
- سرعت آزمون پایین است.

³ Ultrasonic

¹ Eddy Current (EC)

² Giant Magneto Resistance (GMR)



شکل ۳- آزمون فراصوتی که در آن از ارسال امواج مافوق صوت با طول موج کوتاه و فرکانس بالا به داخل جسم و دریافت پالس‌های برگشتی و تفسیر آنها، برای تشخیص عیوب و اندازه‌گیری ضخامت استفاده می‌شود [۱۶].

روش استفاده از تراگذارهای صوتی الکترومغناطیسی^۱ را می‌توان به عنوان یکی از روش‌های نوین فراصوتی طبقه‌بندی کرد. EMAT دارای یک پیچه قرار گرفته در میدان مغناطیسی ایجاد شده در سطح داخلی دیواره لوله می‌باشد. عبور جریان متناوب از پیچه، یک جریان الکتریکی در دیواره لوله ایجاد می‌کند که به علت ایجاد نیروی لورنتز (نیروی اعمال شده به بار الکتریکی متحرک در میدان مغناطیسی)، امواج مافوق صوت ایجاد می‌شود (شکل ۴). نوع و شکل تراگذار، انواع مدهای موج مافوق صوت تولیدی و خصوصیات گسترش آن در دیواره لوله را مشخص می‌کند. برخی از مزایای این روش به شرح ذیل است:

- عدم نیاز به استفاده از ماده واسط

روش نیاز به ایجاد اتصال بین پیزوالکتریک و سطح جسم توسط یک ماده واسط مایع دارد که در برخی از ادوات بازرسی، یک چرخ پر از مایع در تماس با جسم قرار می‌گیرد و پیزوالکتریک در داخل این چرخ گنجانده می‌شود (شکل ۳).

برخی از مزایای این روش به شرح ذیل است:

- اندازه‌گیری طول و عمق عیوب و قابلیت تکرار نتایج
- در ضخامت و قطر لوله مورد ارزیابی محدودیتی وجود ندارد.
- قابلیت اعمال در خم‌ها، شیرها و جوش‌ها
- دقت روش بالاست.
- برخی از معایب این روش به شرح ذیل است:
- محدودیت عبور جریان سیال در هنگام پیگرانی با سنسورهای فراصوتی

- با توجه به نیاز پیزوالکتریک‌ها به ماده واسط مایع، در هنگام حرکت وسیله بازرسی در طول خط لوله، حفظ کردن تماس سنسور با ماده واسط و با سطح لوله مشکل است، بخصوص در خطوط انتقال گاز این امر دشوارتر است [۱۳-۱۶].

استفاده از پروب‌های با ماده واسط هوا بویژه برای بازرسی پره توربین‌ها، استفاده از امواج غیرخطی فراصوتی برای بازرسی بتن‌ها، گسترش سیستم‌های چندکاناله، اسکنرهای ویژه برای کاربردهای خاص و ارتقاء وضعیت تجهیزات سخت افزاری و نرم افزارهای مربوطه، از پیشرفت‌های این آزمون در سالهای اخیر بوده است [۱۷ و ۱۸].

¹ Electromagnetic Ultrasonic Transducer (EMAT)

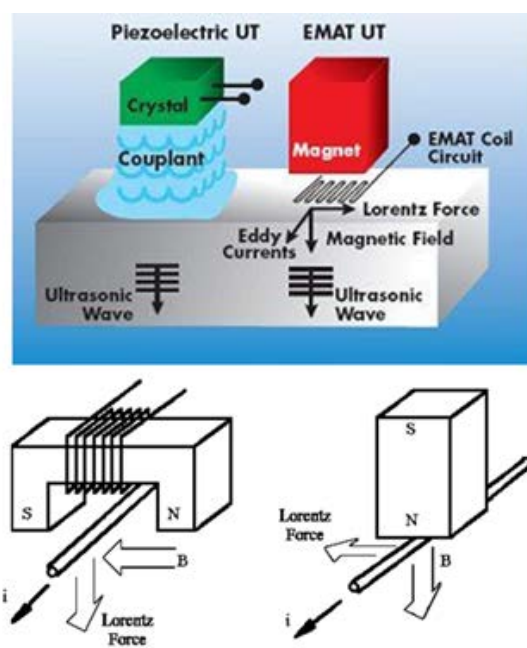
۵- نشر آوایی^۱

وقتی یک نیرو به جسم جامد اعمال می‌گردد، جسم تغییر شکل الاستیک می‌دهد و انرژی کرنشی الاستیک و توزیع تنش، در آن دچار تغییر می‌شوند. با افزایش نیرو تغییر شکل پلاستیکی میکروسکوپی در جسم ایجاد می‌شود که آزاد شدن انرژی الاستیکی ذخیره شده را به صورت امواج الاستیکی دربر خواهد داشت. اگر این امواج از یک حدی بیشتر شوند، می‌توان آنها را با ترا گذارهای پیزوالکتریک حساس، به سیگنال‌های ولتاژی تبدیل کرد (شکل ۵).

این روش شامل یک یا تعدادی ترا گذار فرا صوت است که با اتصال به قطعه و آنالیز اصوات تولیدی یا القایی در سیستم، تشخیص عیوب انجام می‌گیرد. اصوات منتشره ممکن است از رشد ترک، تلاطم یا توربلانس (مانند نشتی) و تغییر در ماده مانند خوردگی باشد.

برخی از مزایای این روش به شرح ذیل است :

- تمامی ساختار از چند محل محدود قابل پایش می‌باشد.
- خط لوله را در حال استفاده و بدون قطع جریان می‌توان تست نمود.
- پایش پیوسته ممکن است.
- این روش قابلیت تمیز دادن عیوب در دیواره داخلی، بین دیواره و دیواره خارجی لوله را به خوبی داراست.
- در صورتی که انرژی کافی آزاد شود، تغییرات میکروسکوپی هم قابل مشاهده هستند.
- این روش برای تمامی مواد جامد قابل استفاده است (انواع فلزات و آلیاژها، بتن، کامپوزیت‌ها و ...)
- قابلیت بازرسی نقاط با دسترسی محدود
- نیازی به ارسال امواج صوتی به داخل جسم ندارد.
- به همراه پیگرانی می‌تواند انجام شود.
- برخی از معایب این روش به شرح ذیل است :
- قابلیت وضوح محدود
- فقط قابلیت تشخیص عیوب، تغییرات و آسیب‌های فعال را دارد.
- هنوز به عنوان یک تکنولوژی رایج در بازرسی خطوط لوله مطرح نیست [۲۳ و ۲۴].
- استفاده از فناوری‌های یادگیری ماشین برای دریافت داده‌های انبوه و تفسیر آنها بر اساس الگوریتم‌های مربوطه



شکل ۴- استفاده از ترا گذارهای صوتی الکترومغناطیسی که در آن نوع و شکل تراگذار، انواع مدهای موج مافوق صوت تولیدی و خصوصیات گسترش آن در دیواره لوله را مشخص می‌کند [۱۶].

- بهبود قابلیت تولید امواج عرضی قطبی شده در بازرسی جوشها
- با تغییر شکل آهنربا و جهت جریان، انواع امواج لامب، عرضی و طولی را می‌توان بدست آورد.
- برخی از معایب این روش به شرح ذیل است :
- نیاز به حفظ فاصله ۱ mm از سطح نمونه
- انرژی فراصوت تولیدی نسبتاً ضعیف است، بنابراین دقت بالایی در تفسیر سیگنال‌ها و تنظیم مدارات قدرت مورد نیاز است.
- استفاده از فرکانس‌های بالا امکان پذیر نیست (امواج در مدهای مختلف تولید می‌شوند).
- فقط برای خطوط انتقال گاز مناسب هستند [۱۹-۲۱].
- جلوگیری از هدر رفت انرژی، اندازه‌گیری‌های دقیق تنش باقیمانده، افزایش سرعت آزمون و اندازه‌گیری پوسته‌های جامد شده در ریخته‌گری‌های پیوسته و ... از پیشرفت‌های این آزمون در سال‌های اخیر بوده است [۲۲].

¹ Acoustic Emission (AE)

۷- خلاصه

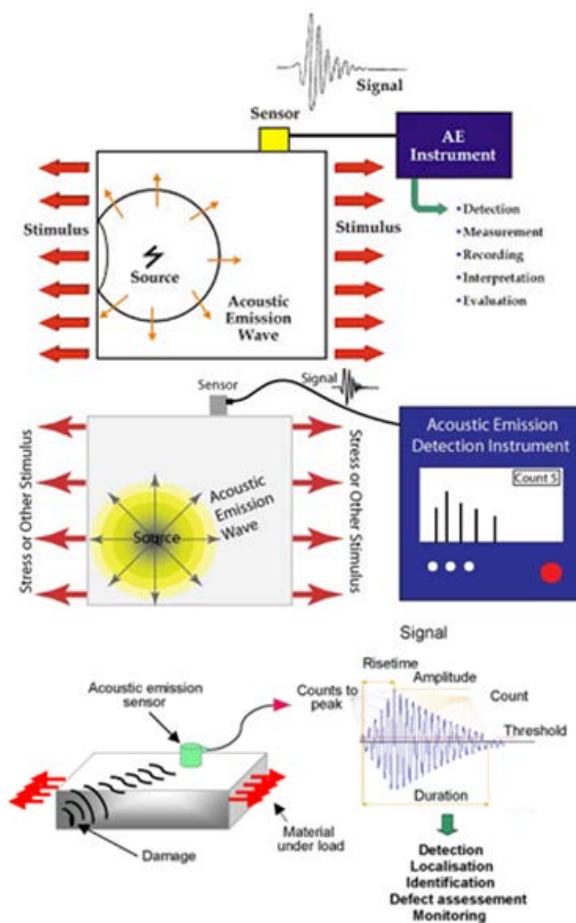
- ۱- آزمون نشت شار مغناطیسی رایج ترین آزمون در بازرسی درون خطی خطوط لوله است و یکی از عیوب مهم این روش مشکل بودن تفسیر داده هاست.
- ۲- آزمون جریان گردابی یک آزمون غیر تماسی و با سرعت پایین است.
- ۳- آزمون فراصوتی یک آزمون رایج است و نتایج دارای دقت بالایی هستند. عیب مهم این روش، نیاز به استفاده از ماده واسط مایع می‌باشد.
- ۴- آزمون نشر آوایی را برای تمامی مواد جامد می‌توان استفاده کرد، اما هنوز این روش به عنوان یک روش رایج در بازرسی درون خطی خطوط لوله مطرح نیست.
- ۵- استفاده از تراگذارهای صوتی، یک روش نوین آزمون فراصوت است که نیاز به استفاده از ماده واسط مایع ندارد.

۸- تشکر و قدردانی

از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی شریف بابت حمایت های مالی و معنوی این مقاله تشکر می گردد.

۹- تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.



شکل ۵ - آزمون نشر آوایی که در آن با تغییر شکل پلاستیکی میکروسکوپی در جسم، انرژی الاستیکی ذخیره شده به صورت امواج الاستیکی آزاد می‌گردد. اگر این امواج از یک حدی بیشتر شوند، می‌توان آنها را با تراگذارهای پیزوالکتریک حساس، به سیگنال‌های ولتاژی تبدیل و شناسایی نمود [۲۳].

بویژه برای بررسی‌های شکست و خستگی در فلزات، فایبرگلاس، چوب، کامپوزیت‌ها، سرامیک‌ها، بتن و پلاستیک‌ها و بررسی نشتی‌ها و افت فشارها در ظروف، مخازن و لوله‌ها و نیز بررسی خوردگی جوش‌ها و ... از پیشرفت‌های اخیر در زمینه آزمون نشر آوایی بوده است [۲۵ و ۲۶]. در جدول ۱، برخی خصوصیات آزمون‌های مختلف غیرمخرب برای بازرسی درون‌خطی خطوط لوله با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

defect depth in ferromagnetic materials via magnetic flux leakage method with a double Hall sensor, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 555, 169341, 2022.

- [4] Albert Teitsma, Technology Assessment for Delivery Reliability for Natural Gas - Inspection Technologies: RFEC, *US Department of Energy National Energy Technology Laboratory*, 2004.
- [5] Konrad Reber, Michael Beller, In-Line Inspection of New Pipelines, NDT Systems & Services AG, Stutensee, Germany, 2019.
- [6] A Review of Magnetic Flux Leakage Nondestructive Testing, B. Feng, J. Wu, H. Tu, J. Tang and Y. Kang, *Materials*, Vol. 15, p. 7362, 2022.
- [7] D. Slessarev, V. Sukhorukov, S. Belitsky, Intron Plus, Moscow, Russia, E. VASIN, N. STEPANOV, Diascan, Likhovitsy, Russia, Magnetic In-Line Inspection of Pipelines: Some Problems of Defect Detection, Identification And Measurement, 2016.
- [8] Huang, X.; Wu, J.; Sun, Y.; Kang, Y. 3D Magnetic Dipole Models of Magnetic Flux Leakage for "concave" and "Bump" Defects. *Int. J. Appl. Electromagn. Mech*, 59, 1305–1312, 2019.
- [9] B. Feng, J. Wu, H. Tu, J. Tang and Y. Kang, A Review of Magnetic Flux Leakage Nondestructive Testing, *Nondestructive Testing. Materials*, 15, 7362, 2022.
- [10] A. V. Ishkov, S. F. Dmitriev, A. O. Katasonov, D. A. Fadeev and V. N. Malikov, Inspection of corrosion defects of steel pipes by eddy current method, *Journal of Physics: Conference Series*, 1728-6596, 012006, 2021.
- [11] Plamen Alexandrov Ivanov, Remote Field Eddy Current Probes for the Detection of Stress Corrosion Cracks in the Transmission Pipelines, 2010.
- [12] K. Bin Ali, A. N. Abdalla¹, D. Rifai, M. A. Faraj, Review on system development in eddy current testing and technique for defect classification and characterization, *IET Circuits Devices Syst.*, Vol. 11 Iss. 4, pp. 330-343, 2017.
- [13] A. Barbian, M. Beller, K. Reber, N. Uzelac, H. Willems, Ultrasonic In-Line Inspection: High Resolution Crack Detection for Pipelines Using A New Generation of Tools, NDT Systems & Services AG; Stutensee, Germany, *NDT Systems & Services AG*, Toronto, Canada, 2014.
- [14] By K. Reber, M. Beller, Ultrasonic In-Line Inspection Tools to Inspect Older Pipelines for Cracks in Girth And Long-Seam Welds, *NDT Systems & Services AG*, Stutensee, Germany, 2013.
- [15] I. Stüwe, L. Zacherl and C. U. Grosse, Ultrasonic

جدول (۱) مقایسه انواع آزمون‌های غیرمخرب برای بازرسی درون خطی خطوط لوله

مشخصه/ نام روش	نشرشار مغناطیسی	جریان گردابی	فرا صوتی	نشر آوایی	تراگذرهای صوتی الکترومغناطیسی
نوع عیوب قابل شناسایی	برای شناسایی حفرهای ناشی از خوردگی	برای شناسایی ترکهای سطح داخلی	برای شناسایی ترکهای جوش و لوله‌گیری قبل از عملیات	عیوب مختلف از جمله جوش و ترکهای قبل از عملیات	برای شناسایی ترکهای جوش و ترکهای قبل از عملیات
سطح اطمینان شناسایی عیوب	۹۰ تا ۱۰۰ درصد	۹۰ تا ۱۰۰ درصد	۸۰ درصد	۸۰ درصد	۸۰ درصد
نوع ماده واسط جهت آزمون	-	-	مایع یا گاز	مایع	گاز
سرعت انجام آزمون	۳ تا ۵ m/s	بیشتر از ۰/۸ تا ۴ m/s	-	-	بیشتر از ۲ m/s

۱۰- منابع

- [1] X. Zhao, V. K. Varma, Gang Mei, B. Ayhan and C. Kwan, In-Line Nondestructive Inspection of Mechanical Dents on Pipelines with Guided Shear Horizontal Wave Electromagnetic Acoustic Transducers, *Oak Ridge National Laboratory*, Nuclear Science & Technology Division, Oak Ridge, 2020.
- [2] N. A. Sharif, R. Ramli, A. Z. Mohamed and M. Z. Nuawi, Theory and development of magnetic flux leakage sensor for flaws detection: A review, *International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAAS)*, Vol. 8, No. 3, pp. 208-216, 2019.
- [3] S. Hao, P. Shi, S. Su and T. Liang, Evaluation of

- and Impact-Echo Testing for the Detection of Scaling in Geothermal Pipelines, *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 42, Article number: 18, 2023.
- [16] Stress Corrosion Cracking Study FINAL REPORT Submitted by: Michael Baker Jr., Inc., 2005.
- [17] W. HILLGER, L. BÜHLING, D. ILSE, Review of 30 Years Ultrasonic systems and developments for the future, *11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)*, October 6-10, 2014, Prague, Czech Republic
- [18] E. NIEDERLEITHINGER, S. MAACK, F. MIELENTZ, U. EFFNER, C. STRANGFELD, Review of recent developments in ultrasonic echo testing of concrete, *The International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures*, SMAR 2019.
- [19] Tu, Z. Zhong, X. Song, X. Zhang, Z. Deng, M. Liu, An external through type RA-EMAT for steel pipe inspection, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 331, 113053, 2021.
- [20] J. Aron, J. Jia, B. Vance, W. Chang, R. Pohler, J. Gore, S. Eaton, A. Bowles, T. Jarman, Development of An EMAT In-Line Inspection System for Detection, Discrimination, and Grading of Stress Corrosion Cracking in Pipelines, February 2015.
- [21] Thomas Beuker, Claus Doescher, Acceptance of EMAT Based In-Line Inspection Technology for the Assessment of Stress Corrosion Cracking and other Forms of Cracking in Pipelines, *ROSEN Technology and Research Center*, Corrosion 2019.
- [22] Magnetic ultrasonic testing method for determining solidified shell thickness during continuous casting, *2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*.
- [23] A. Rai, Z. Ahmad, M. J. Hasan and J.M. Kim, A Novel Pipeline Leak Detection Technique Based on Acoustic Emission Features and Two-Sample Kolmogorov–Smirnov Test, *Sensors* 21(24), 8247, 2021.
- [24] A. Bobrov, M. Kuten, Intellectual Innovations in Acoustic Emission Control in the Safety System of Pipeline Transport, *Transportation Research Procedia*, Vol. 54, pp. 340-345, 2021.
- [25] S. Gholizadeh, Z. Lemana and B.T.H.T. Baharudinb, A review of the application of acoustic emission technique in engineering, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 54, No. 6, 1075-1095, 2015.
- [26] G. Ciaburro and G. Iannace, Machine-Learning-Based Methods for Acoustic Emission Testing: A Review, *Appl. Sci.*, 12, 10476, 2022.