

بررسی فناوری های تست التراسونیک (PAUT و TOFD) در تشخیص عیوب خطوط لوله نفت و گاز

امیرحسین خالقی^{۱*}، مهسا کریمی نژاد^۲

Amirkhaleghiofficial@gmail.com - ۱

Kmahsa394@gmail.com - ۲

خلاصه

حفظ یکپارچگی و قابلیت اطمینان خطوط لوله انتقال نفت و گاز، یکی از چالش‌های اساسی در صنایع انرژی به شمار می‌رود. با توجه به ماهیت حساس این تأسیسات، بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته آزمون‌های غیرمخرب (NDT) جهت تشخیص زودهنگام عیوب ساختاری، امری اجتناب ناپذیر است. در این میان، دو فناوری پیشرفته آزمون التراسونیک شامل آزمون پالس آری (Phased Array Ultrasonic Testing - PAUT) و آزمون زمان پرواز تفاضلی (Time of Flight Diffraction - TOFD) به دلیل دقت بالا در مکان‌یابی و ارزیابی کمی عیوب داخلی، توجه پژوهشگران و متخصصان را به خود جلب کرده‌اند. این مقاله با رویکردی تحلیلی، به بررسی اصول فیزیکی، مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای عملی این دو فناوری در ارزیابی وضعیت خطوط لوله پرداخته و قابلیت‌های آن‌ها را در شناسایی ترک‌ها، خوردگی‌ها و عیوب حجمی مقایسه می‌کند. افزون بر آن، مطالعات موردی و داده‌های تجربی نشان می‌دهند که ترکیب PAUT و TOFD در قالب یک رویکرد مکمل، می‌تواند پوشش تشخیصی را به طرز چشمگیری افزایش داده و ریسک خطای انسانی را به حداقل برساند. نتایج این بررسی، ضرورت به‌کارگیری این فناوری‌های ترکیبی در راهبردهای نگهداشت پیش‌بینانه را برای بهبود ایمنی، کاهش هزینه‌ها و جلوگیری از نشت‌های زیست‌محیطی تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی: آزمون‌های غیرمخرب، تست التراسونیک، PAUT، TOFD، خطوط لوله، تشخیص عیوب، بازرسی جوش، نفت و گاز، ارزیابی یکپارچگی، خوردگی، نگهداری پیشگیرانه، پایش وضعیت

۱. مقدمه

در صنایع نفت و گاز، خطوط لوله به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین زیرساخت‌های انتقال، نقشی حیاتی در زنجیره تأمین انرژی ایفا می‌کنند [1]. بروز عیوبی نظیر ترک‌ها، خوردگی، و ناپیوستگی‌های جوش می‌تواند منجر به نشت مواد خطرناک، انفجار، یا توقف فعالیت‌های عملیاتی شود؛ بنابراین، بازرسی مستمر و دقیق این خطوط از اهمیت بالایی برخوردار است [2]. در این میان، استفاده از روش‌های آزمون غیرمخرب (NDT) به‌منظور پایش وضعیت و تشخیص زودهنگام عیوب، به یکی از ارکان کلیدی ایمنی در این صنعت تبدیل شده است.

در میان روش‌های پیشرفته NDT، فناوری‌های تست التراسونیک فازی (PAUT) و زمان پرواز تفاضلی (TOFD) به دلیل دقت بالا، سرعت اجرا و توانایی در تشخیص عیوب داخلی در خطوط لوله، مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند [3]. این دو روش به صورت مجزا یا ترکیبی در پروژه‌های بازرسی جوش و پایش سلامت لوله‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [4]. با این حال، انتخاب روش مناسب و درک مزایا و محدودیت‌های هر یک نیازمند شناخت دقیق‌تری از اصول عملکرد و قابلیت‌های آن‌هاست [5].

این مقاله با رویکردی مروری، تلاش دارد به این پرسش پاسخ دهد که: فناوری‌های PAUT و TOFD تا چه اندازه می‌توانند در تشخیص دقیق و مؤثر عیوب خطوط لوله نفت و گاز نقش داشته باشند، و چه تفاوت‌ها و مزایایی در کاربرد آن‌ها وجود دارد؟ برای این منظور، ابتدا مبانی آزمون‌های غیرمخرب معرفی می‌شوند، سپس به بررسی دقیق PAUT و TOFD، مقایسه آن‌ها، و در نهایت مزایای کاربرد ترکیبی آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۲. اصول و اهمیت آزمون‌های غیرمخرب (NDT) در خطوط لوله نفت و گاز

آزمون‌های غیرمخرب (Non-Destructive Testing – NDT) مجموعه‌ای از روش‌های تشخیصی هستند که برای ارزیابی سلامت و یکپارچگی تجهیزات صنعتی بدون آسیب‌رساندن به آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در صنایع نفت و گاز، به دلیل حساسیت بالای خطوط لوله و احتمال وقوع حوادث فاجعه‌بار، روش‌های NDT نقش حیاتی در پیشگیری از شکست‌های ناگهانی ایفا می‌کنند [6]. از میان روش‌های مختلف NDT، تکنیک‌های مبتنی بر امواج التراسونیک از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. این روش‌ها با استفاده از انتشار امواج فراصوت در ماده، قادرند بازتاب‌ها، عبورها یا تغییرات انرژی صوتی ناشی از وجود عیوبی مانند ترک‌ها، تخلخل‌ها، یا عدم‌همجوشی‌ها را شناسایی کنند [7]. روش‌های سنتی التراسونیک (UT) هرچند مؤثر بوده‌اند، اما با محدودیت‌هایی همچون نیاز به تفسیر بصری، زاویه محدود پوشش‌دهی، و عدم امکان تهیه نقشه دقیق عیب همراه هستند. به همین دلیل، در سال‌های اخیر استفاده از فناوری‌های پیشرفته‌تر مانند تست التراسونیک فازی (PAUT) و زمان پرواز تفاضلی (TOFD) افزایش یافته است [8]. TOFD و PAUT به عنوان روش‌های نوین التراسونیک نه تنها توانایی تشخیص دقیق‌تر عیوب را فراهم می‌کنند، بلکه امکان تصویربرداری و مستندسازی بهتر عیوب را نیز دارند. این ویژگی‌ها باعث شده‌اند که این دو روش به‌ویژه در بازرسی جوش‌های طولی و محیطی خطوط لوله، به یکی از گزینه‌های اصلی مهندسان بازرسی بدل شوند [9]. در ادامه، هر یک از این دو روش به صورت جداگانه بررسی شده و سپس به مقایسه‌ی مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای ترکیبی آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۳. بررسی فناوری تست التراسونیک فازی (PAUT)

تست التراسونیک فازی یا Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های آزمون غیرمخرب است که در آن از مجموعه‌ای از المان‌های پیزوالکتریک برای ارسال و دریافت امواج فراصوت استفاده می‌شود. برخلاف روش‌های سنتی التراسونیک، در PAUT امکان کنترل جهت، کانونی‌سازی و زاویه انتشار امواج به صورت دینامیک فراهم است [10]. در این روش، چندین المان در یک پروب به صورت آرایه‌ای کنار هم قرار می‌گیرند. با اعمال تاخیر زمانی مشخص به هر المان، می‌توان امواجی با زاویه و عمق دلخواه ایجاد کرد. این قابلیت موجب می‌شود که با یک بار اسکن، پوشش کاملی از ناحیه جوش یا منطقه مورد بازرسی به دست آید [11]. یکی از مهم‌ترین مزایای PAUT، توانایی آن در

ارائه تصویر دو یا سه‌بعدی از ساختار داخلی ماده است. این ویژگی باعث می‌شود که نه تنها تشخیص عیوب با دقت بیشتری انجام شود، بلکه موقعیت دقیق، اندازه، و جهت‌گیری آن‌ها نیز قابل تحلیل باشد [12]. از دیگر مزایای این روش می‌توان به موارد روبرو اشاره کرد: کاهش زمان بازرسی نسبت به UT سنتی؛ قابلیت ذخیره‌سازی نتایج برای تحلیل‌های بعدی؛ عدم نیاز به دسترسی کامل به سطح قطعه (قابل استفاده از یک سمت). با این حال، PAUT نیازمند تجهیزات پیشرفته و اپراتورهای آموزش‌دیده است. همچنین تفسیر نتایج نیاز به تخصص بالایی دارد و در برخی موارد پیچیدگی نرم‌افزارها ممکن است چالش‌زا باشد [13]. در بازرسی خطوط لوله، به‌ویژه در مناطق جوشکاری شده یا نواحی دارای ریسک بالا، PAUT به دلیل دقت بالا در تشخیص ترک‌ها، شکاف‌های ریز و عدم همجوشی‌ها بسیار پرکاربرد است. این روش به‌طور گسترده‌ای برای بازرسی اتصالات جوشی در پروژه‌های انتقال نفت و گاز به کار می‌رود و حتی در بسیاری از استانداردهای بین‌المللی مانند ASME و ISO جایگزین تست رادیوگرافی شده است [14].

۴. بررسی فناوری زمان پرواز تفاضلی (TOFD)

تکنولوژی زمان پرواز تفاضلی یا Time of Flight Diffraction (TOFD) یکی از دقیق‌ترین و قابل‌اعتمادترین روش‌های التراسونیک پیشرفته در شناسایی و ارزیابی عیوب حجمی و ترک‌های موجود در قطعات صنعتی، به‌ویژه در جوش‌های خطوط لوله است. برخلاف سایر روش‌های مرسوم که بر بازتاب مستقیم امواج متکی هستند، TOFD از پدیده‌ی انکسار امواج صوتی در اطراف نوک ترک استفاده می‌کند که موجب افزایش دقت در تخمین اندازه و موقعیت عیب می‌گردد [15]. در روش TOFD، یک جفت پراب شامل فرستنده و گیرنده در دو سوی منطقه جوش قرار می‌گیرند. امواج فراصوت از فرستنده تابیده شده و پس از عبور از قطعه، یا مستقیماً به گیرنده می‌رسند یا در صورت برخورد با نوک عیب، بخشی از انرژی به شکل امواج انکساری بازتاب می‌شود. با اندازه‌گیری دقیق زمان پرواز امواج، می‌توان موقعیت دقیق عیب را با خطای بسیار پایین محاسبه کرد [16]. از جمله مهم‌ترین مزایای TOFD می‌توان به موارد روبرو اشاره کرد: دقت بسیار بالا در تشخیص ترک‌ها و عیوب حجمی؛ توانایی سنجش اندازه واقعی ترک با حساسیت بالا؛ پوشش کامل ناحیه جوش تنها با یک اسکن طولی؛ سرعت بازرسی بالا به‌ویژه در خطوط لوله با طول زیاد. با این حال، TOFD در تشخیص عیوب سطحی یا نزدیک به سطح با محدودیت‌هایی مواجه است. همچنین نیاز به تراز دقیق پراب‌ها و شرایط مناسب کالیبراسیون دارد و در سطوح بسیار زبر یا هندسه‌های پیچیده، کیفیت داده‌ها ممکن است کاهش یابد [17]. این فناوری در بسیاری از پروژه‌های بزرگ انتقال انرژی در سطح بین‌المللی به‌عنوان جایگزینی برای تست رادیوگرافی به کار رفته است. همچنین استفاده هم‌زمان TOFD با PAUT در قالب تست ترکیبی به‌منظور افزایش دقت، امروزه رایج شده و در استانداردهایی مانند BS EN ISO 10863 و API RP 2X نیز مورد تأیید قرار گرفته است [18].

۵. مقایسه بین فناوری‌های PAUT و TOFD و مزایای استفاده ترکیبی

فناوری‌های Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) و Time of Flight Diffraction (TOFD) هر دو از پیشرفته‌ترین روش‌های آزمون غیرمخرب التراسونیک محسوب می‌شوند که در دهه‌های اخیر، به‌ویژه در بازرسی جوش‌های خطوط لوله نفت و گاز، جایگاه ویژه‌ای یافته‌اند. اگرچه هر یک از این روش‌ها به‌تنهایی قابلیت‌های فنی و دقت بالایی در تشخیص عیوب دارند، اما استفاده ترکیبی از آن‌ها تحت عنوان Dual-Modality UT یا روش مکمل التراسونیک، می‌تواند بازدهی تشخیص را به طرز چشم‌گیری افزایش دهد [19].

جدول ۱- مقایسه فناوری‌های PAUT و TOFD

معیار	PAUT (پیزد آری)	TOFD (زمان پرواز تفاضلی)
اصل عملکرد	کنترل زاویه امواج با تأخیر فازی در آرایه‌ها	انکسار امواج از نوک ترک و اندازه‌گیری زمان پرواز
نوع عیوب قابل شناسایی	عیوب سطحی، زیرسطحی، عدم‌همجوشی، حفره‌ها	ترک‌ها و عیوب حجمی عمیق
توان تصویربرداری	بسیار بالا (ایجاد تصویر مقطعی)	متوسط (A-Scan و B-Scan)
حساسیت به عیوب سطحی	بالا	پایین‌تر از PAUT
نیاز به تراز دقیق پراب	نسبتاً کم	بسیار بالا
سرعت بازرسی	بالا	بسیار بالا

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، PAUT و TOFD از لحاظ فنی دارای ویژگی‌ها و کاربردهای مکمل هستند. PAUT در تشخیص عیوب نازک‌تر و سطوح پیچیده موفق‌تر است، در حالی که TOFD دقت بی‌نظیری در اندازه‌گیری ترک‌های حجیم و عیوب داخلی دارد [20]. در سال‌های اخیر، استفاده ترکیبی از این دو فناوری به یک رویکرد صنعتی استاندارد تبدیل شده است. این ترکیب نه تنها نقاط ضعف هر روش را می‌پوشاند، بلکه قابلیت اطمینان سیستم بازرسی را نیز افزایش می‌دهد. در ادامه برخی از مزایای اصلی استفاده ترکیبی را بررسی می‌کنیم:

کاهش نرخ خطاهای نوع دوم (خطای عدم شناسایی عیب): ترکیب PAUT و TOFD باعث افزایش پوشش‌دهی منطقه جوش شده و احتمال از دست رفتن عیوب را کاهش می‌دهد [21].

تأیید متقابل داده‌ها (Cross Validation): نتایج یکی از روش‌ها می‌تواند صحت یافته‌های روش دیگر را تأیید کند. این ویژگی در پروژه‌های با حساسیت بالا بسیار حیاتی است.

صرفه‌جویی در زمان و منابع: استفاده هم‌زمان از دو قالب یک سیستم خودکار یا نیمه‌خودکار، می‌تواند زمان بازرسی را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد.

مورد تأیید استانداردهای بین‌المللی: استانداردهایی نظیر ASME Section V, ISO 10863 و API 1104 به‌کارگیری ترکیبی این روش‌ها را در پروژه‌های حیاتی توصیه کرده‌اند [22]. در صنایع نفت و گاز، به‌ویژه در پروژه‌های خطوط لوله انتقال بین‌قاره‌ای یا فراساحلی، استفاده از PAUT+TOFD در قالب Full Volume Inspection برای بررسی کامل جوش‌ها الزامی شده است. این ترکیب در پروژه‌هایی مانند Trans-Anatolian Natural Gas Pipeline (TANAP) و Nord Stream به‌عنوان راهکار اصلی جایگزین تست رادیوگرافی به‌کار گرفته شده است [23].

۶. روش‌شناسی مطالعه

این مطالعه به‌منظور بررسی کاربرد فناوری‌های بازرسی غیرمخرب PAUT و TOFD در تشخیص عیوب خطوط لوله نفت و گاز طراحی شده است. روش‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل مطالعات کتابخانه‌ای، بررسی مقالات علمی معتبر

و تحلیل داده‌های تجربی از منابع مختلف می‌باشد. در ابتدا، مقالات علمی و فنی در زمینه بازرسی غیرمخرب با استفاده از فناوری‌های PAUT و TOFD، شامل اصول عملکرد، مزایا، معایب، و کاربردهای آن‌ها در صنعت نفت و گاز مورد بررسی قرار گرفت. برای جمع‌آوری داده‌های مربوط به فناوری‌های PAUT و TOFD، منابع مختلفی از جمله کتاب‌های تخصصی، گزارش‌های فنی منتشر شده توسط شرکت‌های بازرسی و پژوهش‌های پیشین در این زمینه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. پس از جمع‌آوری اطلاعات از منابع مختلف، داده‌ها به‌طور دقیق مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند تا جنبه‌های مختلف عملکرد این فناوری‌ها در شبیه‌سازی‌ها و کاربردهای عملی مشخص شود. از این رو، روند مطالعه شامل مرور مقالات و گزارش‌های فنی در پایگاه‌های علمی معتبر، سایت‌های مرتبط با صنعت نفت و گاز و همچنین نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط کارشناسان در این زمینه بوده است. در نهایت، یافته‌ها با استفاده از روش‌های مقایسه‌ای و تحلیلی بررسی و نتایج آن‌ها در قالب پیشنهادات کاربردی برای بهبود روند بازرسی در صنعت نفت و گاز ارائه گردید.

۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای آینده

بازرسی خطوط لوله نفت و گاز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مراحل در تضمین ایمنی و بهره‌وری صنایع انرژی، نیازمند بهره‌گیری از فناوری‌های دقیق، سریع و قابل‌اعتماد است. در این میان، دو روش پیشرفته بازرسی التراسونیک یعنی Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) و Time of Flight Diffraction (TOFD)، نقش مهمی در شناسایی و ارزیابی عیوب جوش و ساختاری ایفا کرده‌اند. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که هر یک از این فناوری‌ها دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند. PAUT با توان تصویربرداری بالا و قابلیت شناسایی عیوب سطحی و نیمه‌سطحی، به‌خوبی در بازرسی‌های دقیق و جزئی به‌کار می‌رود. در مقابل، TOFD با دقت بالا در اندازه‌گیری ابعاد ترک‌ها و تشخیص عیوب حجیم، تکمیل‌کننده‌ای عالی برای PAUT محسوب می‌شود. استفاده ترکیبی از این دو فناوری، به‌ویژه در پروژه‌های با حساسیت بالا مانند خطوط لوله انتقال بین‌المللی، می‌تواند سطح اطمینان از نتایج را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. این ترکیب نه تنها خطاهای انسانی و فنی را کاهش می‌دهد، بلکه مورد تأیید استانداردهای معتبر جهانی نیز می‌باشد.

۷.۱. پیشنهادات برای آینده:

- توسعه تجهیزات ترکیبی قابل حمل و خودکار برای اجرای هم‌زمان PAUT و TOFD در محیط‌های صنعتی.
- آموزش و تربیت نیروی انسانی متخصص برای تفسیر نتایج ترکیبی و به‌کارگیری استانداردهای بین‌المللی.
- انجام مطالعات تطبیقی بیشتر بر روی کارایی این روش‌ها در شرایط محیطی متنوع (مانند دماهای بالا، فشار زیاد، خوردگی داخلی و خارجی).
- به‌کارگیری هوش مصنوعی برای تحلیل نتایج اسکن‌های PAUT و TOFD و تشخیص خودکار عیوب.

۸. مراجع

- 1.Nace International (2021), *Corrosion control in the oil and gas industry*, available at: <https://www.nace.org>
- 2.Gholizadeh, S. (2016), "A Review of Non-Destructive Testing Methods of Composite Materials," *Procedia Structural Integrity*, Vol. 1, pp. 50–57.
- 3.Cheema, M. and Muhammad, N. (2020), "Advanced Ultrasonic Testing Techniques for Weld Inspection: TOFD and PAUT," *NDT & E International*, Vol. 116, Article No. 102353.
- 4.Aziz, M. and Kumar, A. (2018), "A Review of the Use of Phased Array Ultrasonic Testing and Time-of-Flight Diffraction for Weld Inspection in Pipelines," *Materials Evaluation*, Vol. 76, No. 9, pp. 1072–1083.
- 5.Gholizadeh, S. and Karimipour, A. (2021), "Comparative Study of PAUT and TOFD for Defect Detection in Pipeline Inspection," *Journal of Non-Destructive Testing*, Vol. 12, No. 3, pp. 25–36.
- 6.Hellier, C. (2013), *Handbook of Nondestructive Evaluation*, 2nd ed., McGraw-Hill Education, New York.
- 7.Blitz, J. and Simpson, G. (1996), *Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing*, Chapman and Hall, London.
- 8.Cheema, M. and Muhammad, N. (2020), "Advanced Ultrasonic Testing Techniques for Weld Inspection: TOFD and PAUT," *NDT & E International*, Vol. 116, Article No. 102353.
- 9.Gholizadeh, S. and Karimipour, A. (2021), "Comparative Study of PAUT and TOFD for Defect Detection in Pipeline Inspection," *Journal of Non-Destructive Testing*, Vol. 12, No. 3, pp. 25–36.
- 10.Ginzel, R.K. (2011), "Phased Array Ultrasonics – Principles and Applications," *NDT.net*, available at: <https://www.ndt.net>
- 11.Krautkrämer, J. and Krautkrämer, H. (1990), *Ultrasonic Testing of Materials*, Springer-Verlag, Berlin.
- 12.Moles, M.D.C. and Abdo, P. (2014), "Improved Imaging with Phased Array UT," *Materials Evaluation*, Vol. 72, No. 8, pp. 1025–1034.
- 13.Silva, R. and López, J. (2017), "Limitations of Phased Array Ultrasonic Testing in Field Applications," *Journal of NDT Technology*, Vol. 5, No. 2, pp. 15–23.

14. ASME Section V (2021), Nondestructive Examination, The American Society of Mechanical Engineers.
15. Dubois, F. and Ginzle, R. (2012), "Time of Flight Diffraction (TOFD) for Weld Inspection," NDT.net, available at: <https://www.ndt.net>
16. Temple, J.A.G. (2001), "The Role of TOFD in Modern NDT," Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 43, No. 9, pp. 615–619.
17. García, E. et al. (2018), "Limitations of TOFD Technique in Thin-Walled Pipeline Inspection," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 140, No. 2, 021402.
18. ISO 10863:2011, Non-Destructive Testing – Ultrasonic Testing – Use of Time-of-Flight Diffraction Technique (TOFD), International Organization for Standardization.
19. Moles, M.D.C. and Abdo, P. (2014), "Dual-Modality Ultrasonic Testing for Weld Integrity," Materials Evaluation, Vol. 72, No. 9, pp. 1041–1050.
20. Saha, D. and Kumar, R. (2016), "Comparative Study of PAUT and TOFD for Pipeline Inspection," International Journal of NDT Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 22–30.
21. Bhaduri, S.K. (2019), "Reliability of Combined NDT Techniques in Critical Applications," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 141, No. 4, 041702.
22. ISO 10863:2011, Nondestructive Testing – Use of Time-of-Flight Diffraction Technique (TOFD), International Organization for Standardization.
23. TÜV Rheinland (2020), "Inspection Report – TANAP Project," Internal Technical Publication, TÜV Group.
24. Singh, A. and Bhardwaj, R. (2020), "Integration of TOFD and PAUT in Pipeline NDT," Journal of Oil and Gas Engineering, Vol. 45, No. 2, pp. 98–110.
25. ISO 13588:2019, Non-destructive testing of welds — Ultrasonic testing — Use of automated phased array technology.
26. API Recommended Practice 1176 (2016), Assessment and Management of Cracking in Pipelines, American Petroleum Institute.
27. Yang, J. et al. (2021), "AI-based Evaluation of Ultrasonic Testing Data for Pipeline Inspection," NDT & E International, Vol. 121, 102479.