



شناسایی ترک در لوله‌های گاز با استفاده از پرتونگاری دیجیتال، تبدیل موجک و کرولت

امیر موافقی^{۱*}، بهروز رکرک^۱، پیمان رستمی^۲، جهانگیر نکویی^۲

۱- پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران

۲- شرکت مهندسی پرتو آزمون آذر، تهران

* تهران، صندوق پستی ۸۳۶-۱۴۳۹۵، amovafeghi@aeoi.org.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۴ بهمن ۱۳۹۷

پذیرش: ۱۹ مرداد ۱۳۹۸

ارائه در سایت: اردیبهشت ۱۳۹۹

کلیدواژه‌ها:

شناسایی ترک

لوله‌های گاز

پرتونگاری دیجیتال صنعتی

تبدیل کرولت

پردازش تصویر

چکیده

ترک‌ها یکی از عیوب مهم در لوله‌های نفت و گاز است که می‌تواند تحت فشار و تنش زیاد باعث شکستگی گردد. این امر معمولاً حوادث ناخوشایندی را در پی دارد. بنابر این شناسایی به موقع این ترک‌ها می‌تواند از حوادث اسفبار انسانی و تلفات مالی جلوگیری کند. در این تحقیق از روش آزمون غیر مخرب پرتونگاری دیجیتال (رقمی) صنعتی برای شناسایی عیب ترک در لوله استفاده شده است. در خیلی از موارد رادیوگرافی، به دلیل پراکندگی فوتون‌های اشعه ایکس و گاما که در اثر عوامل مختلفی رخ می‌دهد، تصویر پرتونگاره حاصل، عیوب را بخوبی نشان نمی‌دهد و کنتراست مناسبی ندارد. در این تحقیق از روش‌های پردازش تصویر در حوزه موجک استفاده شده است. برای بهبود کنتراست تصاویر رادیوگرافی، از روش موجک کرولت استفاده شده تا نواحی عیب مشخص‌تر شوند. نتایج نشان می‌دهد که این تبدیل به علت داشتن موجک‌های برآمده‌تر و فیلترهای جهتی نسبت به موجک ویولت توانایی بیشتری در مشخص کردن نواحی عیب بخصوص در قسمت‌های انحنا دارند. برای ارزیابی نتایج از نظرات متخصصین رادیوگرافی صنعتی استفاده شده است. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که متخصصین بهبود کنتراست و مشخص‌تر شدن نواحی عیوب را تأیید می‌کنند.

Identification of cracks in gas pipes using digital radiography, wavelet and curvelet transforms

Amir Movafeghi^{1*}, Behrouz Rokrok¹, Peyman Rostami², Jahanghir Nekouei²

1- Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran

2- Parto Azmoon Azar Engineering Co., Tehran, Iran

* P.O. Box: 14395-836, Tehran, Iran, amovafeghi@aeoi.org.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 13 February 2019
Accepted 10 August 2019
Available May 2020

Keywords:

Crack detection,
Gas pipes
Digital industrial radiography (DIR)
Curvelet transform
Image processing

Abstract

In oil and gas pipes, crack is one of the important defects that can lead to the pipelines fractures under high pressure and tension. This usually involves inconvenient and catastrophic events. Therefore, the timely identification of these cracks can prevent horrible human casualties and financial losses. In this research, digital industrial radiography NDT method was used to identify the cracks in the pipes. In many cases, the generated radiographs do not show clearly the defects and radiography images suffer from low contrast because of the photonic scattering of gamma and X-rays. In this research, an image processing method in wavelet domain was implemented. To improve the contrast, the curvelet method is used to make the defect areas more specific. The results show that this method has some superiority to conventional wavelets due to having higher (more emphasized) wavelets than the ordinary wavelets. So it is more capable of defining defect areas, especially in curvature regions. Radiography experts' judgments have been used to evaluate the results. The results of evaluation show that experts confirm the improvement of the contrast and more specific of the defect areas.

۱- مقدمه

غیر مخرب جریان‌های گردابی می‌توان ترک‌های ریز زیر سطح را با دقت بالایی تعیین کرد [۱، ۲]. آزمون فراصوتی که اساس آن بر مبنای ارسال و دریافت امواج و تغییرات صوت هنگام برخورد با لایه‌های زیرین ماده است، دارای هزینه کمتری نسبت به این روش است و دقت بالاتری دارد [۳-۵]. وقتی که ماده‌ای دارای ترک یا عدم یکنواختی در ساختار باشد، امواج صوتی در برخورد با آن به علت وجود اختلاف امپدانس اکوستیکی در مرز لایه‌ها

شناسایی عیب ترک در سیستم‌های انتقال مواد همواره از مشکلات پیچیده بوده که در صورت عدم رفع به موقع آن حوادث جبران ناپذیری بوجود می‌آید. برای بررسی این عیب روش‌های غیرمخرب مختلفی وجود دارد از جمله روش جریان‌های گردابی، آزمون فراصوتی و آزمون پرتونگاری صنعتی. استفاده از هر روش مزایا و معایب خاصی دارد. به کمک آزمون

Please cite this article using:

A. Movafeghi, B. Rokrok, P. Rostami, J. Nekouei, Identification of cracks in gas pipes using digital radiography, wavelet and curvelet transforms, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 26- 32, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تبدیل فوتونهای ایکس به فوتونهای نوری استفاده می‌شود که این فوتونهای نور مرئی خود با برخورد به آرایه‌های فوتو دیود به الکترون تبدیل می‌شوند که می‌توانند پیکسل‌های لایه سیلیکون بی شکل را فعال نمایند. حاصل فعالیت این پیکسل‌ها مجموعه‌ای از داده‌های الکترونیکی است که بوسیله کامپیوتر به تصاویر دیجیتالی با کیفیت بالا تبدیل شده و سپس این تصویر در نمایشگر به نمایش درمی‌آیند. سوسوزن به کار رفته در این روش معمولاً از جنس گادولونیوم یا یدید سزیوم CsI است که البته به دلیل قابلیت‌های خاص یدید سزیوم و امکان رسیدن به قدرت تفکیک مکانی بالاتر در بین سینتیلاتورها، بیشتر از آن استفاده می‌شود. این روش سرعت و قدرت تفکیک مکانی کمتری را نسبت به روش مستقیم ایجاد می‌کند ولی در مقایسه با روش مستقیم قیمت کمتری را دارد. در دستگاه‌های CR به جای کاست حاوی فیلم، از کاست CR که حاوی صفحه‌ای با خاصیت ایجاد تله‌های جذب انرژی (به نام صفحه فسفری) می‌باشد برای عکس برداری استفاده می‌شود [۶]. ساختار دستگاه‌های CR متشکل از کاست‌هایی است که درون هر یک از آنها به جای فیلم یک صفحه فسفری از جنس باریوم فلوروهالید است که قابلیت پاک شدن و استفاده مجدد پس از هر رادیوگرافی را دارند. پس از هر پرتو دهی اطلاعات فوتونهای فرودی روی آن ذخیره می‌شود. بدین ترتیب که پس از پرتو دهی فوتونهای اشعه ایکس موجب می‌شود الکترون‌های لایه فسفری به ترازهای بالاتر و ناپایدار، با سطح انرژی بیشتر، قرار بگیرند. سپس کاست در دستگاه مخصوص خوانش قرار گرفته و با استفاده از نور لیزر قرمز این الکترون‌ها به سطح پایدار انرژی خود بازگردانده می‌شوند و انرژی ذخیره شده به صورت نور مرئی آبی ساطع می‌شود. این نور که همان اطلاعات کد شده تصویر است توسط الکترونیک سیستم قرائتگر به بار الکتریکی تبدیل شده و تشکیل تصویر دیجیتال را می‌دهد. این سیستم نسبت به دو مورد قبلی رادیوگرافی دیجیتال ارزان تر است [۶].

از مزایای مهم سیستم‌های دیجیتال قابلیت ذخیره اطلاعات تصویر روی کامپیوتر و پردازش‌های بعدی آن است [۸، ۹]. این تصاویر معمولاً با بیت‌های بالا (۱۲، ۱۴ و یا ۱۶ بیت) به ازای هر پیکسل ذخیره می‌شوند که قابلیت ایجاد ۴۰۰۰ تا ۶۵۰۰۰ سطح خاکستری را ایجاد می‌کند.

بطور ذاتی تصاویر رادیوگرافی به علت اثر پراکندگی فوتونی کامپتون تحت تاثیر مات شدگی قرار دارند. برای بهتر کردن کنتراست تصویر و مشخص کردن نواحی عیوب لازم است که

منعکس شده و با دریافت و تجزیه و تحلیل این امواج می‌توان نوع عیب، مکان و اندازه آن را تعیین نمود. از روی دامنه و زمان بازگشت این امواج انعکاسی می‌توان به مشخصه‌های عدم یکنواختی دست یافت. این امواج معمولاً می‌توانند فرکانس‌هایی را در محدوده ۱ MHz تا ۶ MHz داشته باشند. این روش معمولاً برای لوله‌هایی با ضخامت بیشتر از ۲ تا ۵ میلی‌متر پاسخ خوبی را دارد ولی برای ضخامت‌های کمتر به علت وجود ناحیه مرده در مبدل خطا بالاتری را حاصل خواهد کرد. است.

یکی دیگر از آزمون‌های غیر مخرب آزمون پرتونگاری است که با داشتن هزینه بیشتر نسبت به این دو روش مزایایی چون ایجاد تصویر واضح از محل خوردگی و ترک و مشخص کردن ابعاد نسبی و هندسه ترک را نیز دارد. در بازرسی پرتونگاری صنعتی از اشعه ایکس یا گاما برای پرتونگاری استفاده می‌شود. در این روش پرتو به جسم تابیده و و با جسم برهم کنش‌های مختلف مانند فوتو الکتریک و کامپتون می‌کند. برای تصاویر معمول تا انرژی زیر ۳۰۰ کیلو الکترون ولت اشعه ایکس استفاده می‌شود ولی برای ضخامت‌های بالا که باید نفوذ بیشتر باشد از اشعه گاما استفاده می‌شود. مقدار جذب اشعه در ماده تابعی از چگالی و ضخامت و جنس ماده است. میزان پرتو جذب شده در ناحیه معیوب جسم تغییر کرده و این تغییرات در جذب پرتو روی آشکارساز دیده خواهد شد. این تصویر را پرتونگاره می‌نامند [۶، ۷]. برای آشکارسازی پرتوها از فیلم و آشکارسازهای دیگر استفاده می‌شود. در پرتونگاری سنتی استفاده از فیلم رایج است ولی به علت استفاده از مواد مصرفی شیمیایی برای ظهور و ثبوت فیلم و مصرف خود فیلم و برخی مشکلات دیگر این روش در حال جایگزین شدن با تکنیک‌های جدید رادیوگرافی می‌باشد. در پرتونگاری به روش نوین دیجیتال که با روش‌های مستقیم، غیر مستقیم و سی آر، CR، صورت می‌پذیرد، از آشکار سازهای مسطح و صفحات تصویربرداری فسفری مخصوص برای ایجاد تصویر استفاده می‌شود. در روش مستقیم فوتون‌های اشعه ایکس و یا پرتوهای گاما به صورت مستقیم به بار الکتریکی تبدیل می‌شود و نیازی به سنتیلاتور نیست. در روش مستقیم از آرایه‌های سلنیوم بی شکل همراه با لایه نازک ترانزیستوری برای تبدیل مستقیم انرژی فوتونهای ایکس به سیگنال‌های الکتریکی استفاده می‌شود. از مزایای این روش سرعت و کیفیت بالای تشکیل تصویر به دلیل تبدیل مستقیم فوتون‌های ایکس به بار الکتریکی است. در روش غیر مستقیم از سنتیلاتور برای

¹ Computed radiography

² Flat panels

³ Phosphor Imaging Plates

⁴ Post-processing

تابع موجک مادر مشهور است استفاده می‌شوند. تبدیل کرولت یک تبدیل هندسی است که توسط کاندس و همکارانش معرفی شد [۱۲]. در تبدیل کرولت هدف تولید کرولت پایه Φ و تجزیه و تحلیل تصویر از طریق انتقال، مقیاس و دوران حول موجک پایه است. در فضای کرولت متغیر مکان، متغیر فرکانس و مختصات قطبی را داریم. فرایند تبدیل با دو پنجره شعاعی و زاویه‌ای انجام می‌شوند. در این تبدیل موجک‌های پایه گوه‌ای شکل و بسیار حساس به زاویه هستند که در جهات و مقیاس‌های مختلف روی تصویر اعمال می‌شود. این توابع پایه، ایزوتروپیک و نرم و نامنفی هستند که مقادیر حقیقی می‌گیرند [۱۲-۱۴]. تبدیل کرولت در مقیاس‌ها و زوایای مختلف، برخلاف دیگر تبدیل‌های زاویه‌ای مثل موجک گابور، محدوده فرکانسی را به طور کامل پوشش می‌دهد. از ویژگی‌های اصلی تبدیل کرولت حساسیت آن به جهت، لبه‌ها و توانایی ارائه جزئیات بالاگذر از لبه‌های اشیاء در مقیاس‌های مختلف از طریق ضرایب پراکنده غیر صفر است [۱۲].

در این تحقیق از موجک کرولت برای شناسایی ترک‌های موجود در لوله‌های انتقال مواد استفاده شده است. با توجه به جهات مختلف ترک‌ها در لوله و شکل‌های متنوع آنها که دارای لبه‌های انحنادار نیز می‌باشند، بنظر می‌رسد که این تبدیل کارایی لازم برای افزایش کنتراست در نواحی ترک و بازسازی مناسب تصویر را داشته باشد. در ادامه نحوه آماده سازی پرتونگاره‌ها و پیاده‌سازی الگوریتم آورده شده است.

۲- روش‌ها

۲-۱- پرتونگاری صنعتی

تصاویر مورد استفاده در این تحقیق از بانک اطلاعاتی تصاویر رادیوگرافی صنعتی پروفیسور دومینگو مری می‌باشد که با همکاری موسسه تحقیقات رادیوگرافی دیجیتال بخش NDT در آزمایشگاه متالورژی فدرال آلمان تهیه شده است [۱۵]. قطعات با عیوب مشخص، با روش CR و یا فیلم پرتونگاری شده اسکندر مخصوص LS85 SDR با قطر بیم لیزر ۴۰/۳ میکرون یا ۶۳۰ dpi از شرکت لامیسیس خوانده و پردازش اولیه شده‌اند.

فرمت اولیه تصاویر TIFF است که بدون فشرده شدن و در ابتدا بصورت ۱۲ بیتی تهیه و سپس بصورت ۸ بیتی خاکستری ذخیره شده‌اند [۱۵]. نمونه‌ای از این تصاویر در شکل ۱ نشان داده شده است. تعداد تصاویر انتخابی ۱۰ عدد بوده و در انتخاب آنها سعی شده که علاوه بر مات شدگی، تصویر عیب ترک نیز در

پردازش روی تصاویر انجام شود. الگوریتم‌های زیادی مبتنی بر مکان و فرکانس وجود دارد که برای افزایش کنتراست بکار می‌روند از جمله انواع فیلترهای بالاگذر و پایین گذر، صافی گوسین، صافی گابور و انواع تبدیل‌های فوریه و موجک. هر فیلتر خصوصیات مختلفی از تصویر را واضح‌تر می‌کند. در بسیاری از موارد این الگوریتم‌ها با از روش‌های تکرار برای بهبود تصاویر استفاده می‌شود. یاحقی [۷] و همکاران از گوشه یابی بر اساس تغییرات گرادیان برای شناسایی نواحی آسیب استفاده کرده‌اند. آناندا [۸] از روش آستانه گذاری بر اساس خواص مورفولوژیکی تصویر، نواحی عیب را واضح‌تر کرده‌اند. لیم و همکاران به توسعه روش‌هایی بر مبنای شبکه عصبی و تکرار برای این امر پرداخته‌اند [۹] و روش‌های دیگری از پردازش تصویر نیز برای این امر استفاده شده است [۱۰، ۱۱].

یکی دیگر از روش‌های کارآمد در پردازش تصاویر تبدیل فوریه پیوسته و گسسته است که کاربرد زیادی در افزایش کنتراست و بازسازی تصویر دارد. تبدیلات فوریه که بر اساس تجزیه سیگنال بر اساس موج‌های سینوسی و کسینوسی است توسط ژوزف فوریه معرفی شد. این تبدیل به علت عدم تشخیص موج‌های فرکانس‌های یکسان در ترکیبات مختلف کارایی لازم در جدا کردن مؤلفه‌های مناسب از تصویر را ندارد [۱۲]. تبدیلات موجک دسته‌ای از توابع ریاضی هستند که برای تجزیه تصویر به مؤلفه‌های فرکانسی استفاده شده بر مبنای توابع موجک می‌باشد. موجک‌ها که به عنوان موجک‌های دختر شناخته می‌شوند انتقال یافته و مقیاس شده یک تابع موجک مادر با طول متناهی و نوسانی شدیداً میرا هستند. در مقایسه با تبدیل فوریه، تبدیل موجک دارای خصوصیت محلی‌سازی مناسبی است، تبدیل فوریه یک پیک تیز دارای تعداد زیادی ضریب است، چرا که توابع پایه تبدیل فوریه توابع سینوسی و کسینوسی هستند، ولی توابع موجک توابعی هستند که بیشتر انرژی آنها در بازه کوچکی متمرکز شده و به سرعت میرا می‌شوند. بنابراین با انتخاب مناسب موجک‌های مادر می‌توان فشرده‌سازی بهتری در مقایسه با تبدیل فوریه انجام داد. از انواع مشهور توابع مادر موجک‌ها، مورلت و کلاه مکزیکی هستند. موجک‌ها اولین و ساده‌ترین موجک شناخته شده است که پایه‌هایی متعامد برای محاسبه را ارائه می‌دهد. این تبدیل بر اساس انواع الگوریتم‌های مختلف توانایی تجزیه تصویر را دارد و بر این اساس موجک‌های مختلف کانتورلت، شیرلت، ریجالت و کروولت داریم که اساس الگوریتم‌های ریاضی آنها متفاوت است [۱۲]. در این تبدیلات نمونه‌های نمونه‌های انتقال یافته و مقیاس شده یک تابع که به

^۱ BAM

$$f(x) = \sum_{j,k,l}^n f(x) \overline{\varphi_{j,k,l}(x)} dx \quad (7)$$

در شکل ۲ نمونه‌ای از این فیلترهای جهتی نشان داده شده است.



شکل ۲ نمونه‌ای از فیلترهای جهتی در کرولت برای اندازه و زوایای مختلف
Fig. 2 The typical directional filter for different amplitudes and directions

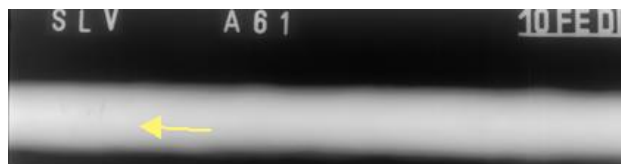
۳- نتایج

در این تحقیق برای شناسایی عیوب ترک در پرتونگاره‌های ایکس از تبدیل کرولت استفاده شده است تصاویر پرتونگاری حاوی عیوب ترک طولی و عرضی و مایل با روش بخش قبل تهیه شده‌اند. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود تصاویر مات و کدر هستند و نواحی عیب در آنها واضح نیست (نواحی عیوب ترک در شکل با پیکان نمایش داده شده‌اند. برای وضوح بیشتر تصویر و ورفع مات شدگی از تبدیل کرولت استفاده شد. در این تبدیل پارامترهای جهت و اندازه مقدار ۳ و ۴ انتخاب شدند. با اعمال الگوریتم دیده شد که با توجه به مشخص نبودن مقدار انحراف معیار واقعی در نویز تصویر نمی‌توان تصویر واضحی بدست آورد.

در شکل ۳ خروجی الگوریتم برای انحراف معیار نویز ۵، ۵۰ و ۱۰۰ نشان داده شده است. دیده می‌شود که با زیاد شدن مقدار انحراف معیار نویز، تصویر دارای مات شدگی بیشتری می‌شود. پیدا کردن یک انحراف معیار واقعی در تصاویر واقعی وجود نداشت؛ چون تصاویر با قطعات مختلف که دارای اندازه و ضخامت‌های متفاوت بودند. در نتیجه پراکندگی ذاتی در آنها به علت برهم‌کنش‌های مختلف، مات شدگی‌های متفاوت ایجاد می‌کرد. بنابر این با انتخاب انحراف معیار نویز بزرگ تصویر مات شده ای بدست آمد که از تصویر اصلی کم شد، در این حالت تصویر واضحی بدست آمد که مناطق ترک در آنها با کنتراست خوبی مشخص است.

در شکل ۴ تصاویر بازسازی شده با برای انحراف معیار نویز ۵، ۵۰ و ۱۰۰ نشان داده شده است. مقایسه شکل ۱ و ۴- الف نشان می‌دهد که خطوط مشخص کننده کیفیت تصویر (IQI)

آنها وجود داشته باشد. برای انجام پردازش‌های بعدی بر روی این تصاویر رادیوگرافی دیجیتال، نرم افزار متلب (MATLAB ۲۰۱۴) استفاده شده است.



شکل ۱ نمونه‌ای از تصویر پرتونگاری
Fig. 1 The typical radiography image

۲-۲- تبدیل کرولت

تبدیل کرولت [۱۲] جزو تبدیلات چند مقیاسی است که با اعمال یک موجک، در جهت و مقیاس مختلف بر روی تصاویر، دسته ضرایبی را در جهت‌ها و مقیاس‌های گوناگون تولید می‌کند. هر کدام از این دسته ضرایب که در یک قطاع قطبی واقع شده اند، بیانگر اطلاعات تصویر در آن مقیاس و جهت خاص هستند. ضرایب کرولت را می‌توان توسط رابطه (۱) محاسبه کرد [۱۶-۱۸]:

$$U_j(r, \theta) = 2^{\frac{3j}{4}} W(2^{-j}r) V\left(\frac{2^{\frac{j}{2}}\theta}{2\pi}\right) \quad (1)$$

که در این رابطه r و θ متغیرها در مختصات قطبی، W و V پنجره شعاعی و فرکانسی هستند که حقیقی، یکنواخت و غیر منفی می‌باشند. $|j/2|$ قسمت حقیقی $j/2$ است. مقادیر W که مقداری مثبت است در محدوده $r \in (1/2, 2)$ عمل می‌کند و V که مقداری حقیقی است در بازه $t \in [-1, 1]$ است. این پنجره‌ها باید شرایط زیر را پوشش دهند:

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} W^2(2^j r) = 1 \quad r \in \left(\frac{3}{4}, \frac{3}{2}\right) \quad (2)$$

$$\sum_{l=-\infty}^{\infty} V^2(t-l) = 1 \quad t \in \left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) \quad (3)$$

برای $\hat{\varphi}_j(\omega) = U_j(\omega)$ موجک کرولت برای $\theta \in [0, 2\pi]$ و $0 \leq \theta \leq 2\pi$ و انتقال پارامتر $k = (k_1, k_2) \in Z^2$ چنین محاسبه می‌شود:

$$\varphi_{j,k,l}(x) = \varphi_j \left(R_{\theta_l}(x - x_k^{(j,k)}) \right) \quad (4)$$

R_{θ} زاویه چرخش روی تصویر و l پارامتر انتقال است.

$$R_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

معادله ضرایب چنین است:

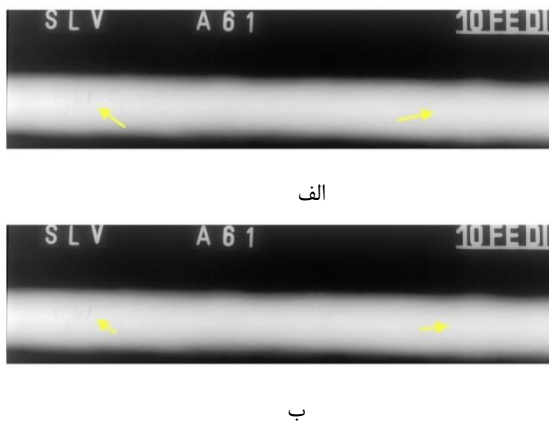
$$c(j, k, l) = \int f(x) \overline{\varphi_{j,k,l}(x)} dx \quad (6)$$

که با این تبدیل $f(x)$ به صورت رابطه (۷) نوشته می‌شود:

¹ Image Quality Indicator

در شکل ۳ قابل ملاحظه است که تصاویر در نواحی آسیب کنتراست بهتری داشته اند و نواحی انحنای شکل نسبت به تصویر اولیه کاملاً واضح تر است. در عین حال IQI نیز روی تصویر بازسازی شده بوضوح قابل تشخیص است، در حالیکه در روی تصویر شکل ۱ این خطوط قابل تشخیص نیستند. ترک ناحیه راست که در تصویر اصلی دیده نمی شود در تصویر بازسازی شده کاملاً مشخص است

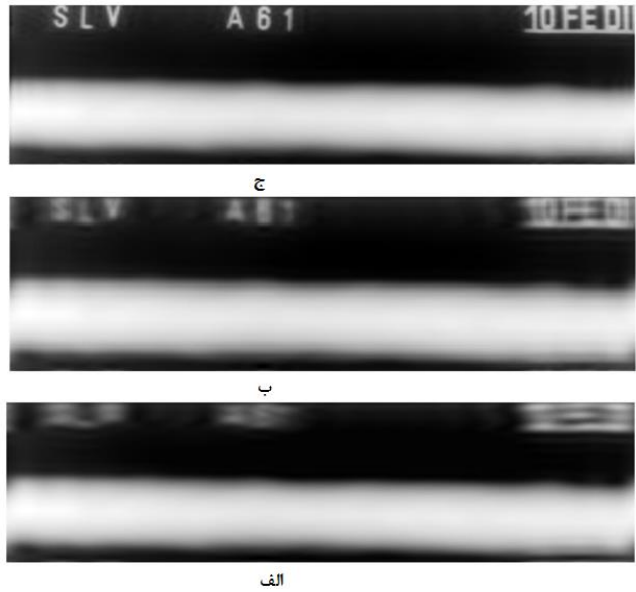
برای مقایسه نتایج روش کرولت با سایر روش‌ها، نتایج حاصل از اجرای تبدیل موجک با موجک مادرهار و کلاه مکزیکی در شکل ۵ نشان داده شده است. این الگوریتم برای چهار سطح تجزیه اجرا شده و مؤلفه‌های عمودی و قطری و افقی برای هر سطح بدست آمده اند. سپس با استفاده از سطح آستانه مؤلفه‌های کوچک که حاوی نویز هستند حذف شده و تصاویر بازسازی شده با ترکیب مؤلفه‌ها بدست آمده‌اند. در شکل ۴ دیده می‌شود که قسمت‌های ترک در روی شکل محو هستند و وضوح کافی ندارند. در این الگوریتم تغییرات سطح آستانه و تعداد سطوح تجزیه در راستاهای افقی، عمودی و قطری می‌تواند در کیفیت تصویر خروجی مؤثر باشد [۱۴، ۲۱، ۲۲] ولی در این تحقیق به علت مات شدگی زیاد تصاویر، نواحی عیب واضح تر نشده و به عبارت دیگر این الگوریتم کارایی لازم را در شناسایی ترک‌ها که همان لبه‌های انحنادار تصویر هستند را ندارد.



شکل ۵ الف- تصویر خروجی الگوریتم برای موجک‌هار و سطح آستانه ۱۰ ب- برای موجک کلاه مکزیکی و سطح آستانه ۱۰
Fig. 3 The output images of the wavelet algorithm for a) haar wavelet and threshold level 10 b) Mexican hat wavelet and threshold level 10

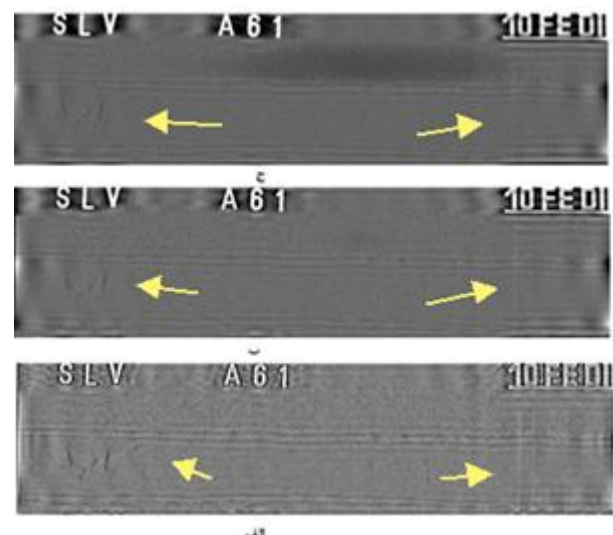
برای بررسی بهتر عملکرد تبدیل موجک نتایج حاصل از اعمال آن روی چند تصویر پرتونگاره نشان داده شده است. در شکل‌های ۶- الف، ج و ه پرتونگاره‌هایی از تصاویر جوش نشان داده شده‌اند. با بررسی این پرتونگاره‌ها مشخص است که علی

در شکل اول قابل تشخیص نیست ولی در روی تصویر دوم چهار خط به وضوح قابل تشخیص است که علت آن حذف زمینه و وزن‌دهی به جزئیات تصویر بوده است. از مهمترین مشکلات اجرای تبدیل کرولت، تعیین مقدار آستانه، تعداد اندازه و جهت است. در اینجا طبق پیشنهاد مرجع [۱۲] تعداد اندازه ۴ و تعداد جهت‌ها ۱۶ و ۸ در نظر گرفته شده که در نتایج تغییر محسوسی دیده نشده است.



شکل ۳ تصویر خروجی الگوریتم کرولت برای انحراف معیار نویز الف- ۵، ب- ۵۰ و ج- ۱۰۰

Fig. 3 The output images of the curve let algorithm for the noise standard division a) 5 b)50 and c)100



شکل ۴ تصاویر بازسازی شده شکل ۱ برای انحراف معیار نویز الف- ۵، ب- ۵۰ و ج- ۱۰۰

Fig. 4 The reconstructed images for the noise standard division a) 5 b) 50 and c) 100

است که پردازش تصویر یک پرتونگاره بر اساس وزن دهی به بعضی از اطلاعات مهم بر اساس الگوریتم اجرا شده و دادن وزن کمتر به سایر اطلاعاتی است که در تصویر وجود دارند. بنابر این قطعا در هر پردازشی قسمتی از اطلاعات کم اهمیت‌تر، وزن دهی کمتری خواهند داشت. بنابر این در ارزیابی تصاویر توسط متخصصین لازم است پرتونگاره اصلی و پردازش شده همزمان بررسی شوند تا فرد متخصص بتواند بطور جامع اطلاعات پرتونگاره‌ها را بررسی کند.

دقت در نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که این الگوریتم خمش‌ها و انحنای موجود در پرتونگاره‌ها را بطور مناسب وزن‌دهی کرده و جزئیات تصویر را بخوبی نشان داده است.

برای ارزیابی از نظرات متخصصان پرتونگاری استفاده شد. در این ارزیابی از ۳ فرد متخصص در امر رادیوگرافی صنعتی خواسته شد که به تصاویر بازسازی شده با دو الگوریتم تبدیل کرولت و تبدیل موجک که از ۱۰ تصویر پرتونگاره انتخابی ساخته شده بودند امتیازاتی بین ۱ تا ۵ را برحسب عالی، خوب، مناسب، بد و خیلی بد بدهند. این امتیازات می‌توانست بصورت مقادیر اعشاری نیز داده شود. متوسط نتایج حاصل از امتیازات ارزیابی این افراد برای هر تصویر در جدول ۱ درج شده است.

بررسی نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که متخصصین کارایی الگوریتم بازسازی برای بهبود کنتراست نواحی ترک را تأیید کرده و در بعضی از تصاویر بهبود تصویر بازسازی شده که جزئیات آن مشخص است تا صد در صد تأیید شده است. بهتر شده لبه‌ها و جزئیات تصویر از جمله خطوط کیفیت تصویر را تأیید می‌کنند.

جدول ۱ نتایج ارزیابی تصاویر توسط متخصصین پرتونگاری

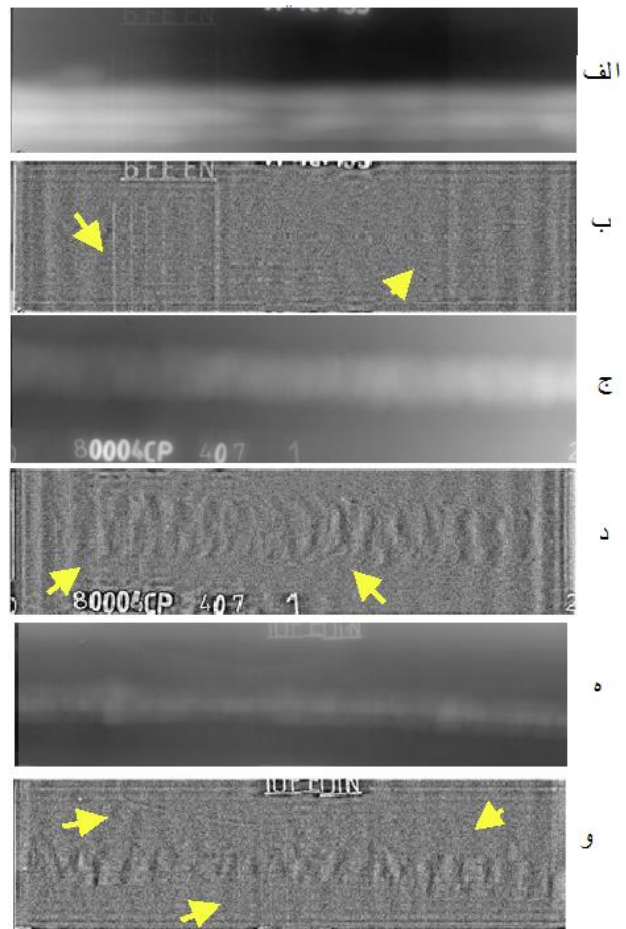
Table 1. The results of the images by radiograph

پرتونگاره	تصویر اصلی	تصویر بازسازی شده با کرولت	تصویر بازسازی شده با موجک
۱	۵۳٪	۹۳٪/۳	۵۷٪
۲	۵۱٪	۱۰۰٪	۵۶٪
۳	۶۶٪/۱۶	۸۶٪/۱۶	۶۶٪/۱۶
۴	۴۳٪	۹۱٪/۲	۵۵٪
۵	۶۳٪	۹۵٪/۱	۶۷٪
۶	۶۰٪/۱۶۱	۸۹٪/۱۶۱	۶۶٪/۱۶۷
۷	۴۱٪/۴۰	۷۳٪/۳	۴۳٪
۸	۵۸٪	۱۰۰٪	۵۸٪
۱۰	۶۱٪	۹۷٪/۳	۶۱٪

۴- مراجع

[1] H M Sadek. NDE technologies for the examination of

رغم دیده شدن ریشه جوش، تصاویر به قدری مات هستند که خطوط IQI بسختی روی تصاویر دیده می‌شوند. و علائم سربی و نوشته‌های روی آنها خوانا نیستند. در این حالت تصویر ریشه جوش قابل بررسی نیست. در شکل‌های ۶- ب، د و و تصاویر بازسازی شده آنها را به روش کرولت نشان می‌دهد. در شکل ۶- ب سه خط از خطوط IQI مشخص هستند که در پرتونگاره اصلی (شکل ۶- الف) بسختی دیده می‌شوند. خطوط سربی روی شکل ۶- الف کاملاً خوانا هستند ولی ریشه جوش با کیفیت خوبی نشان داده نشده است.



شکل ۶ الف، ج، ه- تصاویر پرتونگاره اصلی ب، د، و- تصویر خروجی الگوریتم کرولت

Fig. 3 a, c, e) The original radiographs b, d, f) The output images of the curvelet algorithm

در شکل ۶- ج دیده می‌شود که ریشه جوش و برجستگی‌های آن بخوبی نشان داده شده‌اند و نوشته‌های علائم سربی نیز وضوح کافی دارند.

شکل ۶- و ریشه جوش را نشان می‌دهد و همچنین جزئیات تصویر مانند حروف IQI واضح‌تر دیده می‌شوند. لازم به تأکید

- Modeling & Simulation*, Vol. 5, pp. 861-899, 2006.
- [13] J. Ma, G. Plonka, The Curvelet Transform: IEEE Signal Processing Magazine, 2010, 27 (2), 118-133.
- [14] C. Xuefeng, N. Lei, Study on the Multi-Focus Image Fusion Based on Combined Opportunity Curvelet and Wavelet Transform, *Journal of Convergence Information Technology*, Vol. 7. No. 18, pp. 324-331, 2012
- [15] D. Mery, V. Riffo, U. Zscherpel, G. Mondragón, I. Lillo, I. Zuccar, H. Lobel, M. Carrasco, GDxray: The database of X-ray images for nondestructive testing, Vol. 34, Springer, 2015.
- [16] A. G. Mahyari and M. Yazdi, A novel image fusion method using curvelet transform based on linearity dependency test, in *Digital Image Processing, 2009 International Conference on*, pp. 351-354, 2009.
- [17] E. J. Candès, D. L. Donoho, Continuous curvelet transform: I. Resolution of the wavefront set, *Applied and Computational Harmonic Analysis*, Vol. 19, pp. 162-197, 2005.
- [18] E. J. Candès, D. L. Donoho, Continuous curvelet transform: II. Discretization and frames, *Applied and Computational Harmonic Analysis*, Vol. 19, pp. 198-222, 2005.
- [19] EN 14096-1, Non-destructive testing – Qualification of radiographic film digitization systems – part 1: Definitions, qualitative measurements of image quality parameters, standard reference film and qualitative control, *European Norm*, 2004.
- [20] EN 14096-2, Non-destructive testing – Qualification of radiographic film digitization systems-part 2: Minimum requirement, *European Norm*, 2004.
- [21] L. Huang, Zh. Wei, W. Jun, Z. Sun. Combination of Contrast limited Adaptive Histogram Equalization and Discrete Wavelet Transform for Image Enhancement. *IET Image Processing*, Vol. 9, No. 10, pp. 908-915, 2015.
- [22] M. Pratima, S. M.K. Performance Analysis of DWT - OFDM and FFT - OFDM using Various Digital Modulation Techniques and Channel Coding, *International Journal of Computer Applications (0975 –8887)*, Vol. 128, No. 11, pp. 34-39, 2015.
- heat exchangers and boiler tubes – principles, advantages and limitations, *Insight*, Vol. 48 No. 3, March 2006.
- [2] R. P. Uhlig, M. Zec, H. Brauer, and A. Thess, Lorentz Force Eddy Current Testing: a Prototype Model. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 31, 357–372, 2012.
- [3] ISO 2400: Non-destructive testing-Ultrasonic testing - Specification for calibration block, No. 1, 2012.
- [4] ISO 22825, Non-destructive testing of welds - Ultrasonic testing - Testing of welds in austenitic steels and nickel-based alloys , 2012.
- [5] A. Mostavi,; N. Kamali, N. Tehrani, Sh.-W. Chi, D. Ozevin, J. E. Indacochea,. Wavelet Based Harmonics Decomposition of Ultrasonic Signal in Assessment of Plastic Strain in Aluminum *Measurement*. 106: 66–78. doi:10.1016/j. measurement. 2017.04.013, 2017.
- [6] J. T. Bushberg, J. A. Seibert, Edwin. M. Leidholdt, J. M. Boone, The Essential Physics of Medical Imaging, 2012, *LIPPINCOTT WILLIAMS & WILKINS*.
- [7] E. Yahaghi, M. Hosseini-Ashrafi, Enhanced defect detection in radiography images of welded objects, *Nondestructive Testing and Evaluation*, <https://doi.org/10.1080/10589759.2018.1544251>.
- [8] A.R.S. Ananda, and P. Kumar, , Flaw detection in radiographic weld images using morphological watershed segmentation technique, *NDT&E Int.*, 2009, Vol. 42, pp. 2–8.
- [9] T.Y. Lim, M. Ratnam, , and M.A. Khalid, Automatic classification of weld defects using simulated data and an MLP neural network, *Insight*, March 2007, Vol 49, pp. 154–159.
- [10] M. T. Sasanpour, A. Taheri, Determination of Probabilistic Distribution Function of Background and Defect Optical Densities for X-Ray Radiography Images of a Steel Plate, *Journal of Nondestructive Evaluation*, December 2016, 35:61, 2016.
- [11] F. Inanc, A Backscatter Radiography Simulation Study, *Journal of Nondestructive Evaluation*, December 2007, Volume 26, Issue 2–4, pp. 33–46, 2006.
- [12] E. Candès, L. Demanet, D. Donoho, L. Ying, Fast discrete curvelet transforms, *Multiscale*