





Improvement of Defect Size Measurement in Radiography Images by Recursive Image Processing Method

Amir Movafeghi¹  | Amirahamad Shojaee² | Faezeh Ghasemi² | Aboutaleb Kermeini²  | Behrouz Rokrok¹  | Zeinab Naghshnejad¹ | Nafiseh Araghian¹ | Effat Yahaghi³ 

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran; Emails: amovafeghi@aeoi.org.ir
2. NDT Lab., Iran Nuclear Regulatory Authority (INRA), Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran.
3. Faculty of Science, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Article Information:

Research Article

Received 30 July 2024

Revised 17 October 2024

Accepted 19 October 2024

Keywords:

Industrial radiography, non-destructive testing, defect size measurement, Recursive filter, Image processing

ABSTRACT

Measuring defect sizes is very important in determining weld strength. This size is also used to evaluate the object on the test for accept or reject criteria according to the relative standards. One of the important methods for measuring different defects' sizes is industrial radiography testing (RT), a non-destructive testing method. Radiography is carried out using penetrating X or Gamma rays. Radiography is a volumetric method and can give information from the inside the different objects. Various factors, such as the magnification of the radiographic image, the fogginess of the radiographs, the non-point source, and the inherent scattering of X-rays, affect on the measurement and the accuracy of the defect sizing. In particular, size measurement for defects with larger distance respect to the film or radiography detector can be with more uncertainty. This is due to more shadowiness of rays with larger distances. For radiography imaging, an industrial Computed Radiography System (CR) was used. General purpose imaging phosphor plates with a laser resolution of 50 micrometers have been used. The X-ray source was an industrial powerful X-ray tube with a voltage of up to 300 kilovolts. In this research, utilizing the distance measurement between the lines in the duplex image quality indicator (DIQI) tool as a known length, the size of defects in standard parts in Sonakit educational test kit that have specific defects is estimated and compared with the original value. To decrease the blurring, a recursive filter method is used to make the edges sharper to better estimate the defect sizes. The results show that the measurement of defects is related to the accuracy of the user in estimating the pixels of the defect regions and the sharpness of the edges. The measurement error is reported between 6% and 19% for the defect measurement in the standard parts examined.

Cite this article: Movafeghi, A., Shojaee, A., Ghasemi F., Kermeini, A., Rokrok, B., Naghshnejad, Z., Araghian, N., Yahaghi, E. (2024). Improvement of Defect Size Measurement in Radiography Images by Recursive Image Processing Method. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (4), 33-40.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2024.470763.1146>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

افزایش دقت اندازه‌گیری ابعاد عیوب در آزمون غیر مخرب رادیوگرافی صنعتی با استفاده از پردازش تصویر به روش فیلتر بازگشتی

امیر موافقی^۱ | امیر احمد شجاعی^۲ | فائزه قاسمی^۲ | ابوطالب کرمانی^۲ | بهروز رکرک^۱ | زینب نقش نژاد^۱ | نفیسه عراقیان^۱ | عفت یاحقی^۲

۱. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران؛ رایانامه: amovafeghi@aeoi.org.ir
۲. آزمایشگاه آزمون‌های غیر مخرب، مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.
۳. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران.

چکیده:

اندازه‌گیری ابعاد عیوب مختلف در تعیین استحکام جوش اهمیت زیادی دارد. اندازه‌ی عیب همچنین نقش مهمی برای رد یا قبول شدن قطعه در حال بازرسی را با توجه به استانداردهای مربوطه دارد. یکی از روش‌های مهم برای اندازه‌گیری ابعاد این عیوب، روش رادیوگرافی صنعتی است که در رسته آزمون‌های غیر مخرب قرار می‌گیرد. رادیوگرافی با استفاده از نفاشعه ایکس و یا گاما انجام می‌گیرد. رادیوگرافی یک روش حجمی محسوب می‌شود و می‌تواند اطلاعاتی در مورد حجم داخلی قطعات به ما بدهد. عوامل مختلفی مانند بزرگنمایی ایجاد شده در تصویر رادیوگرافی، مات شدگی ناشی از عدم نقطه‌ای بودن منبع و پراکندگی ذاتی اشعه ایکس و گاما که باعث مات شدگی تصویر رادیوگرافی می‌شود، در اندازه‌گیری سایز عیوب در این روش تاثیرگذار هستند و دقت روش را تحت تاثیر قرار می‌دهند. به خصوص با توجه به مات شدن لبه‌های عیوب واقع در فواصل دورتر نسبت به محل قرار گرفتن فیلم و یا آشکار ساز تصویر برداری، اندازه‌گیری ابعاد این نوع عیوب با خطای بیشتری همراه خواهد بود. برای تصویربرداری از روش رادیوگرافی دیجیتال با صفحات فسفری (CR) استفاده شد. برای تولید پرتوهای ایکس از یک تیوب ایکس با توان تا ۳۰۰ کیلو ولت استفاده گردید. در این تحقیق، با استفاده از اندازه فاصله خطوط در ابزار شاخص کیفیت تصویر مقدار عیوب در قطعات استاندارد سوناکیت با عیوب مشخص تخمین زده شده و با مقدار اصلی مقایسه می‌شود. برای رفع مات شدگی از روش فیلتر بازگشتی استفاده شده تا لبه‌ها تیزتر شوند و امکان تخمین عیوب بهتر شود. نتایج نشان می‌دهد که اندازه‌گیری ابعاد عیوب در این روش به دقت کاربر در تخمین پیکسل‌های مربوط به ناحیه عیب و تیز بودن لبه‌ها دارد و برای قطعات استاندارد بررسی شده بین ۶٪ تا ۱۹٪ خطای اندازه‌گیری وجود دارد.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۵/۰۹

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۷/۲۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۷/۲۸

کلیدواژگان:

رادیوگرافی صنعتی، آزمون‌های غیر مخرب، اندازه‌ی عیوب، فیلتر بازگشتی، پردازش تصاویر

استناد: ۱. موافقی، امیر؛ شجاعی، امیر احمد؛ قاسمی، فائزه؛ کرمانی، ابوطالب؛ رکرک، بهروز؛ نقش نژاد، زینب؛ عراقیان، نفیسه و یاحقی، عفت. (۱۴۰۲). افزایش دقت اندازه‌گیری ابعاد عیوب در آزمون غیر مخرب رادیوگرافی صنعتی با استفاده از پردازش تصویر به روش فیلتر بازگشتی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۴)، ۳۳-۴۰.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2024.470763.1146>



۱- مقدمه

تصویر ورودی اعمال شده و تصویر خروجی را می‌دهد. در این تحقیق از یک روش خطی بازگشتی با کرنل جعبه‌ای برای افزایش کنتراست تصاویر رادیوگرافی قطعات استانداردهای با عیوب مشخص برای رادیوگرافی استفاده شده است تا مقادیر عیوب اندازه‌گیری شده و سپس با مقدار واقعی عیوب مقایسه شود. لازم به ذکر است قطعات استاندارد رادیوگرافی مورد استفاده، ساخت شرکت سونا (سوناکیت)^۴ می‌باشند [۱۱]. معیار سنجش، اندازه فاصله خطوط در ابزار شاخص کیفیت تصویر دوتایی^۵ DIQI بوده است. برای تخمین بهتر ناحیه عیب از فیلتر بازگشتی برای تیزتر شدن ناحیه لبه‌ها استفاده شده است [۱۲].

۲- روش‌ها

۲-۲ فیلتر بازگشتی RF^۶

برای یک سیگنال یک بعدی، فیلتر بازگشتی [۹] برای فیلتر کردن بدون حفظ لبه به این صورت تعریف می‌شود:

$$J(x,y) = (1-a)I(x,y) + aJ(x-1,y-1) \quad (1)$$

در این معادله I و J به ترتیب ورودی و خروجی فیلتر هستند و " a " یک ضریب بازگشتی است که بین ۰ و ۱ تنظیم می‌شود. خروجی فیلترهای بازگشتی که به عنوان ضربه بی نهایت نیز شناخته می‌شوند، ترکیبی از ورودی‌ها و خروجی‌های قبلی است. برای فیلتر کردن لبه‌ها، معادله (۱) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$J(x,y) = (1-a^d)I(x,y) + a^d J(x-1,y-1) \quad (2)$$

که در آن d فاصله بین دو همسایه i و j است. با توجه به اینکه a کمتر از ۱ است، اگر d افزایش یابد، a^d به سمت صفر می‌رود و لبه حفظ می‌شود. a چنین محاسبه می‌شود:

$$a = \exp\left(-\frac{\sqrt{2}}{\sigma_H}\right) \quad (3)$$

که در آن σ_H یک مقدار کنترلی برای محدوده فیلتر یک بعدی است، یعنی برای یک تصویر معین، الگوریتم بر روی هر ردیف تصویر اعمال می‌شود. با افزایش a^d (به عنوان مثال در لبه‌ها)، به صفر نزدیک شده و بنابراین $I(x,y)$ مطابق معادله

یک روش بازرسی سریع و موثر برای شناسایی عیوب بدون آسیب رساندن به قطعه، آزمون رادیوگرافی (RT: Radiography Testing) است. در آزمون RT از اشعه ایکس و گاما برای بررسی ساختار و عیوب داخل جسم استفاده می‌شود. این اشعه در عبور از جسم تضعیف شده در RT سنتی توسط فیلم رادیوگرافی آشکارسازی می‌شود اما در رادیوگرافی کامپیوتری (CR^۱) و دیجیتال، به ترتیب توسط صفحات تشخیصی قابل استفاده مجدد فسفری و آشکارسازهای صفحه‌ای تخت^۲ آشکارسازی می‌شود [۱-۲]. اشعه ایکس عبوری یک تصویر رادیوگرافی را ایجاد می‌کند که به میزان تضعیف اشعه در نقاط مختلف جسم بستگی دارد [۳-۵]. تصویر اشعه ایکس بوجود آمده به دلیل وجود پراکندگی اشعه ایکس و سایر نویزها مات شدگی دارد. در بسیاری از موارد لازم است که برای افزایش کنتراست تصویر از روش‌های مختلف پردازش تصویر استفاده کرد [۲]. مثلاً الگوریتم‌هایی در حوزه‌های مکانی و فرکانسی یا در حوزه موجک وجود دارند که برای بهبود پرتونگاره‌ها استفاده می‌شوند [۶-۸]. انتخاب روش مورد نظر بستگی به ویژگی‌های تصاویر، دقت اطلاعات مورد نیاز و همچنین زمان اجرا برای پردازش تصاویر دارد. ساده‌ترین الگوریتم‌های پردازشی، معمولاً فیلترهایی در حوزه مکان هستند. فیلتر مکانی خطی و غیرخطی شامل کانولوشن نرمال شده (NC) [۶]، پیچش درون‌یابی (IC) [۷]، و فیلتر بازگشتی (RF) [۸] از جمله الگوریتم‌های مکانی هستند. این فیلترها دارای ویژگی‌های خروجی بسیار متفاوتی هستند و برای کاربردهای خاص طراحی شده‌اند. در این فیلترها یک کرنل مانند یک تابع گاوسی یا یک تابع جعبه^۳ با هدف برجسته کردن جزئیات اصلی در تصویر اصلی درهم آمیخته می‌شوند. از سوی دیگر، در فیلترهای بازگشتی که الگوریتم‌های مختلفی دارند، در یک روش تکراری خروجی تصویر را مجدداً به عنوان ورودی در نظر گرفته شده و تصویر بازسازی می‌شود [۹-۱۰]. کرنل در این الگوریتم بازگشتی می‌تواند یک تابع خطی و یا غیر خطی باشد که بصورت چند مرحله تکرار به

⁴ Sonakit

⁵ Duplex Image Quality Indicator

⁶ Recursive filtering

¹ Computed Radiography

² Flat panel

³ Box



الف



ب



ج

شکل ۱) الف- کیف آموزشی سوناکیت [۱۱] ب- نمونه‌ای از یک صفحه جوشکاری شده با عیوب مشخص و ج- سطح مقطع آن

۳-۲ رادیوگرافی

برای تهیه تصاویر پرتونگاری، قطعات استاندارد در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری از چشمه که یک تیوب مولد اشعه ایکس با

(۲) هیچ تغییری در پیکسل ندارد و لبه‌ها حفظ می‌شوند. از نقطه نظر دیگر، تصویر خروجی به تصویر خروجی قبلی و تغییرات a و d، بستگی دارد.

در این تحقیق، الگوریتم‌های RF با کرنل جعبه‌ای به عنوان فیلترهای حفظ لبه در رادیوگرافی‌های قطعات استاندارد‌های با عیوب مشخص برای رادیوگرافی صنعتی استفاده شده است. الگوریتم‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB (R 2023 b) و یک کامپیوتر 11th Gen Intel(R) Core(TM) i9- با فرکانس ۲٫۵ GHz، با ۱۶ گیگابایت رم، پیاده‌سازی و بر روی تصاویر رادیوگرافی دیجیتالی اعمال شدند.

۲-۲ قطعات استاندارد‌های با عیوب مشخص (

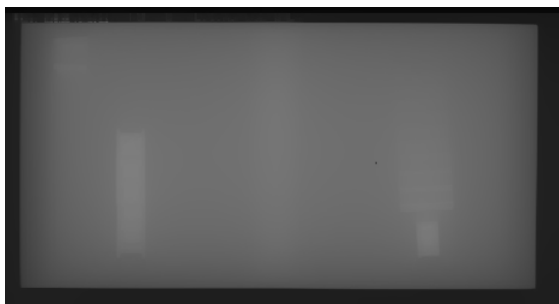
سوناکیت ۱)

این قطعات شامل مجموعه‌ای استاندارد شده از جوش‌های مینیاتوری و مقاطع آن‌ها هستند که همراه آن‌ها تصویر رادیوگرافی برای نشان دادن اصول تشخیص عیب، تفسیر عیب و اندازه اولیه آن‌ها داده شده است. هر کیت دارای انواع قطعات صفحه‌ای و استوانه‌ای هستند که دارای عیوب مختلف سطحی و حجمی در بدنه جوش هستند. سطح مقطع عیوب نیز در قطعات مجزا تهیه شده است. همه قطعات در یک کیف حمل قرار دارند. روی هر صفحه یک نقص ایجاد شده است. جزئیات مکان نقص، معیارهای آزمون و پذیرش و عکس رادیوگرافی برای هر نمونه در مجموعه توضیحات قرار داده شده است. صفحات از جنس استیل با ضخامت ۰٫۶ تا ۱٫۵ سانتی‌متر و در ابعاد ۱۵ در ۷٫۵ سانتی‌متر هستند. در شکل ۱-الف مجموعه یک سوناکیت نشان داده شده که دارای ۹ صفحه تخت و تی شکل جوشکاری شده است که هر کدام عیوب مختلفی دارند. سطح مقطع هر عیب نیز در مجموعه وجود دارد. شکل ۱-ب نمونه‌ای از یک صفحه جوشکاری شده با عیب نفوذ ناقص را نشان می‌دهد که سطح مقطع آن در شکل ۱-ج نشان داده شده است. اندازه عیوب روی صفحات استاندارد و قابل اندازه‌گیری هستند [۱۱].

¹ Sonakit

می‌کند، می‌توان با زیاد در نظر گرفتن σ_H و تکرار الگوریتم تصویر مات را بدست آورد و برای داشتن یک تصویر تیز، تصویر پردازش شده خروجی را از تصویر اولیه کم کرد. باید در نظر داشت که بالا بردن تعداد تکرارها باعث افزایش زمان اجرای برنامه می‌شود، بنابراین، یک مصالحه بین زمان و مات شدگی تصویر خروجی وجود دارد.

برای اجرای الگوریتم RF پارامترهای σ_H برابر ۶۰ و تعداد تکرارها ۳ در نظر گرفته شده است. در شکل ۳ خروجی RF و تصویر بازسازی شده شکل ۲ نشان داده شده است. بررسی شکل ۳- الف نشان می‌دهد که به علت بزرگ انتخاب شدن σ_H و تکرار شدن الگوریتم در ۳ مرحله، لبه‌های تصویر خروجی صاف شده‌اند و خطوط DIQI و IQI، خط جوش، اعداد سربی و منطقه عیب در روی تصویر واضح نیستند. با کم کردن این تصویر از رادیوگراف شکل ۲ تصویر شکل ۳- ب بدست آمد که در آن لبه‌ها تیزتر شده و جزئیات بهتر از رادیوگرافی‌های اصلی در شکل ۲ دیده می‌شوند. ۱۱ جفت خط در ناحیه DIQI در تصویر بازسازی شده قابل دیدن هستند و که ۵ جفت خط کاملاً مجزای از هم قابل تشخیص هستند. در رادیوگرافی اصلی شکل ۲، ۹ جفت خط دیده می‌شوند که در آنجا نیز ۵ جفت خط اول بطور مجزا دیده می‌شوند و به علت مات شدگی تصویر خطوط ۹ تا ۱۱ در این تصویر قابل تشخیص نیستند. خطوط ناحیه IQI در رادیوگرافی اصلی و بازسازی شده قابل تشخیص نیستند. اعداد سربی و حروف مشخص کننده DIQI و IQI در تصویر بازسازی شده واضح‌تر دیده می‌شوند. در این تصاویر رادیوگرافی اصلی و بازسازی شده خطوط IQI دیده نمی‌شوند.



الف

ولتاژ ۱۶۰ کیلو ولت است قرار داده شد. جریان تابش برای این قطعات ۳ میلی-آمپر و مدت تابش ۳ دقیقه بود. در عملیات پرتونگاری از صفحات CR به عنوان آشکارساز استفاده شد. بعد از پرتونگاری صفحات CR بوسیله اسکنر لیزری مخصوص CR روبش شده و تصاویر با فرمت DICOM، ۱۶ بیتی تشکیل شده است که قابل تبدیل به فرمت‌های رایج Tiff و Jpeg هشت بیتی و دوازده بیتی هستند. در رادیوگرافی از حروف سربی برای علامت‌گذاری تصاویر و شاخص کیفیت تصویر DIQI و IQI استفاده شده است. نمونه‌ای از تصویر رادیوگرافی تهیه شده در شکل ۲ نشان داده شده است. در تمام مراحل رادیوگرافی استانداردهای مربوطه رعایت شده است [۱۳-۱۴].



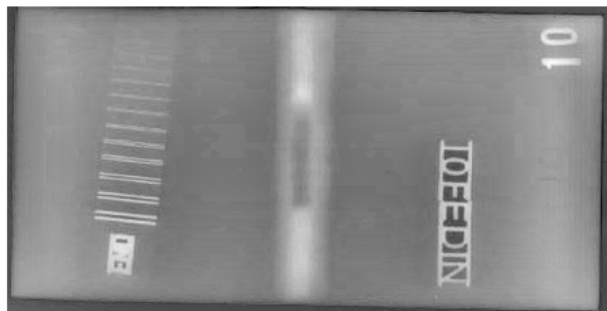
شکل ۲) نمونه‌ای از تصویر رادیوگرافی تهیه شده از قطعات سوناکیت

۳- نتایج

در این مطالعه به منظور بررسی صحت تخمین اندازه عیوب مختلف از روی تصاویر رادیوگرافی، از قطعات استاندارد شده سوناکیت که دارای عیوب با اندازه مشخص هستند استفاده شده است. در رادیوگرافی قطعات از IQI، DIQI و اعداد برای مشخص کردن کیفیت تصویر و نام نمونه استفاده شده است. در نمونه تصویر رادیوگرافی که در شکل ۲ نشان داده شده است علاوه بر ناحیه جوش و عیب آن، خطوط دو تایی DIQI نیز قابل مشاهده هستند. با توجه به مه گرفتگی ناشی از پراکندگی اشعه ایکس، این نواحی مات هستند و تشخیص لبه‌های آن‌ها برای اندازه‌گیری ابعاد عیوب مشکل است. برای رفع مات شدگی الگوریتم RF که در بخش قبل توضیح داده شد، برای افزایش کنتراست تصویر، استفاده شد. با توجه به مشخص نبودن تابع نویز نمی‌توان از الگوریتم RF برای از بین بردن نویز بصورت مستقیم استفاده کرد. در الگوریتم RF، افزایش σ_H باعث هموارسازی لبه می‌شود، و تکرار مداوم فیلتر معرفی شده، تصویر خروجی را صاف



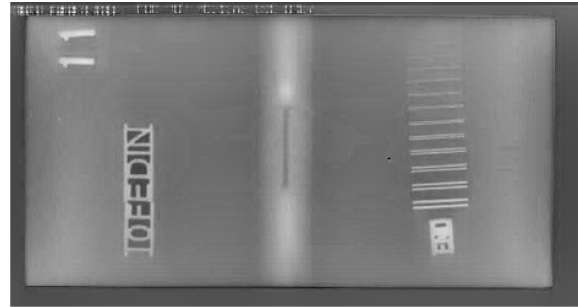
ج



د

شکل ۴ الف و ب- رادیوگرافی اصلی از دو عیب، ج و د- تصاویر بازسازی شده آن‌ها.

برای تخمین ابعاد عیوب از فاصله بین دو خط DIQI استفاده شد. فاصله دو جفت سیم اول و دوم مطابق استاندارد ۵ میلی‌متر است که در تعداد پیکسل‌های آن روی تصویر قابل تشخیص است. با شمارش پیکسل‌های مورد نظر و تناسب با پیکسل‌های دو جفت خط DIQI می‌توان به اندازه تقریبی عیب دست پیدا کرد. در جدول ۱ اندازه‌گیری عیوب با این روش و اندازه‌های واقعی عیوب که با کولیس با دقت ۰/۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده مقایسه شده‌اند. اندازه‌گیری‌ها توسط پنج کاربر متخصص رادیوگرافی انجام شده است. متوسط اندازه‌گیری‌ها و انحراف معیار (مقادیر داخل پرانتز) آن‌ها در جدول درج شده است. در تصاویر رادیوگرافی اصلی اندازه‌گیری‌ها به دلیل مات شدگی تصویر سخت‌تر و با خطای بیشتری نسبت به تصاویر بازسازی شده همراه بوده و انحراف معیار آنها نیز بیشتر بوده است. برای عیب نفوذ بیش از حد تشخیص ناحیه عیب به علت تغییرات آرام ماده جوش که در شکل ۴-الف نیز دیده می‌شود، مشکل بوده است.



ب

شکل ۳ الف- تصویر خروجی الگوریتم RF برای $\sigma_H = 60$ و تعداد تکرار ۳ برای شکل ۲ ب- تصویر بازسازی شده حاصل از کم شدن شکل ۳-الف از تصویر رادیوگرافی شکل ۲

در شکل ۴-الف و ب تصاویر رادیوگرافی دو قطعه ۱۲ و ۱۰ که مربوط به عیوب نفوذ بیش از حد و تقعر است نشان داده شده‌اند و تصاویر بازسازی شده آنها در دو شکل ۴-ج و د دیده می‌شوند. در این دو شکل ناحیه عیب واضح‌تر شده و خطوط DIQI نیز واضح‌تر دیده می‌شوند. در دو شکل ۴-الف و ج ناحیه عیب نفوذ بیش از حد به دلیل تجمع ماده الکتروود سفیدتر از سایر نواحی جوش دیده می‌شود. و برعکس در دو شکل ۴-ب و د به علت تقعر در ناحیه جوش و کم شدن ماده الکتروود ناحیه جوش تیره‌تر دیده می‌شود زیرا مقدار اشعه ایکس بیشتری به آشکارساز رسیده است.



الف



ب

جدول (۱) اندازه واقعی عیوب و مقادیر بدست آمده از روی رادیوگرافها و تصاویر بازسازی شده آنها

شماره قطعه	نوع عیب	اندازه واقعی (cm)	اندازه عیب از تصویر رادیوگرافی اصلی (cm)	اندازه عیب از تصویر بازسازی شده (cm)
۱۰	نفوذ ناقص	۲/۸۳ (۱۷٪)	۲/۷۸ (۲۵٪)	۲/۷۹ (۱۳٪)
۱۱	نفوذ بیش از حد	۲/۷۱ (۳۰٪)	۲/۵۳ (۴۲٪)	۲/۶۳ (۲۷٪)
۱۲	تقعر جوش	۲/۴۶ (۱۲٪)	۲/۲۲ (۳۴٪)	۲/۴۰ (۲۳٪)

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای بررسی صحت اندازه‌گیری عیوب در رادیوگرافی، اندازه عیوب صفحات استاندارد سوناکیت جوش داده شده با استفاده از فاصله بین دو جفت خط اول و دوم DIQI اندازه‌گیری شده و با مقادیر اصلی اندازه‌گیری شده از روی قطعات مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اندازه‌های به دست آمده به یکدیگر نزدیک هستند. تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده به دلیل خطای کاربر در اندازه‌گیری تعداد پیکسل‌های تصویر و تفاوت تشخیص کاربر در شناسایی دقیق منطقه عیب است. خطای ۶ تا ۱۹ درصدی بین اندازه‌های واقعی و مقادیر محاسبه شده از روی تصاویر رادیوگرافی اصلی و بازسازی شده وجود دارد. مقادیر بدست آمده از تصاویر بازسازی شده به علت تیز شدن لبه‌ها و مشخص شدن دقیق‌تر ناحیه عیب، به مقدار واقعی نزدیک‌تر هستند.

۵- مراجع

- [4] Udhagar, S., Sakthivel, M., & Ganeshkumar, P. (2019). Monitoring of friction stir welding based on vision system coupled with machine learning algorithm. *Measurement*, 144, 135-143.
- [5] Halim, S.A., Petrus, B.T., Ibrahim, A., Manurung, Y.H.P., & Jayes, M.I. (2013). Weld defect detection on digital radiographic image using level set method. *AIP Conference Proceedings*, 1557(1), 195-199.
- [6] Durand, F., & Dorsey, J. (2002). Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images. In *SIGGRAPH '02*, 257-266.
- [7] Meijering, E., & Unser, M. (2003). A note on cubic convolution interpolation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 12(4), 477-479.
- [8] Albanese, G., Cipolla, M., & Valenti, C. (2011). Genetic normalized convolution. *International Conference on Image Analysis and Processing - ICIAP 2011: Image Analysis and Processing*, pp. 670-679.
- [9] Shi, J., & Reichenbach, S.E. (2006). Image interpolation by two-dimensional parametric cubic convolution. *IEEE Transactions on Image Processing*, 15(7).
- [10] Blu, T., Thévenaz, P., & Unser, M. (2004). Linear interpolation revitalized. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(5), 710-719.
- [11] Sonaspection. (2024). Training and examination kits and specimens - Educational kits. Retrieved July 2024 from <https://sonaspection.com/products/training-and-examination-kits-and-specimens/educational-kits/>.
- [1] McPherson, T.J., & Stwalley, R.M. (2022). Engineering challenges associated with welding field repairs. *Engineering Principles - Welding and Residual Stresses*.
- [2] Aucott, L., Huang, D., Dong, H.B., Wen, S.W., Marsden, J.A., Rack, A., & Cocks, A.C.F. (2017). Initiation and growth kinetics of solidification cracking during welding of steel. *Scientific Report**, 7, 40255.
- [3] Yahaghi, E., & Hosseini-Ashrafi, M.E. (2019). Enhanced defect detection in radiography images of welded objects. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 34(1), 13-22.

- [12] ISO 19232-5. (2019). Non-destructive testing - Image quality of radiographs. Part 5: Determination of the image unsharpness value using duplex wire-type image quality indicators.
- [13] ISO 17636-2. (2013). Non-destructive testing of welds—Radiographic testing—Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors. Geneva.
- [14] ISO 14096-2. (2013). Non-destructive testing of welds—Qualification of radiographic film digitization systems - Part 2: Minimum requirements. Geneva.