



بررسی تجربی تصویربرداری صنعتی دو-انرژی با پرتوی ایکس در آزمون‌های غیرمخرب به روش ترکیبی FRF/MF

کبیر، مصطفی^(۱) - رکرک، بهروز^(۲) - موافقی، امیر^(۲) - آفریده، حسین^(۱)

^۱دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، گروه کاربردپرتوها

^۲سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

چکیده:

تصویربرداری صنعتی تک انرژی معمول با پرتوی ایکس در بسیاری از موارد که نیاز به بازرسی همزمان دو جسم با اعداد اتمی متفاوت هستند، جواب قابل قبولی ارائه نمی‌کند. تصویربرداری دو-انرژی با استفاده از دو طیف پرتوی ایکس که یکی در انرژی های بالا و دیگری در انرژی پایین است، یا با تفکیک یک طیف به انرژی های بالا و پایین، به علت ضریب تضعیف موثر مختلف مواد، کنتراست بهتری را به ارمغان می‌آورد. در این مقاله به شرح تجربی پیاده سازی این روش و نتایج آن پرداخته شده است. برای پیاده سازی آن از تکنیک فیلترهای چرخان مقابل گسیل پرتوی ایکس (FRF) و آشکارسازهای دیجیتال CR که در دو طرف یک فیلتر مسی با ضخامت ۳ میلی متر قرار گرفته است (MF)، استفاده شده است. تصاویر Diconde استحصال شده سپس با استفاده از نرم افزارهای پردازش تصویر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و SNR نرمالیزه شده برای آن محاسبه گشت. برای دو گوه فلزی با جنس های فولاد-۳۰۴ و آلومینیوم این کار انجام پذیرفت. نتایج حاکی از این است که این روش می‌تواند به عنوان یک روش قابل اعتماد در آزمون های غیرمخرب، مخصوصاً زمانی که از یک جسم با پیکربندی چند ماده ای تصویربرداری کنیم، به حساب آید.

کلمات کلیدی: آزمون های غیرمخرب، پرتوی ایکس، تکنیک دو-انرژی، فیلتر میانی، فیلترهای چرخان جلویی، آشکارساز CR

Experimental Investigation on Industrial Dual-Energy X-Ray Radiography in Non-destructive Testing Using Hybrid FRF/MF Method

Kabir, Mostafa¹; Rokrok, Behrouz²; Movafeghi, Amir²; Afarideh, Hossein¹

¹ Energy Engineering and Physics Department, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran

² Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran

Abstract:

Ordinary Single-energy industrial radiography using X-rays does not provide an acceptable image in many cases, specially where two objects with different atomic numbers are required to inspect simultaneously. Dual-energy imaging with two X-ray spectra, or two separated parts of one spectrum, one in high energy (HE) and the other in low energy (LE), brings a better contrast due to its different effective attenuation coefficient. This paper describes the experimental description of the implementation of this method and its



results. To implement it, the frontal rotating filter (FRF) technique and CR digital detectors, which are located on both sides of a copper middle filter (MF) with a thickness of 3 mm, have been used. The DICONDE images were obtained and analyzed using image processing software and the normalized-SNR (SNR_n) was calculated for it as well. This work was done for two steel-304 and aluminum step wedges. Our results indicate that this method can be considered as a reliable method in non-destructive testing, especially in a multi-object configuration items.

Keywords: Non-destructive testing, X-ray, Dual-energy Technique, Frontal rotating filters, Middle filtration, CR detectors

مقدمه :

روش های غیر مخرب که به طور کلی به آن ها آزمون های غیرمخرب می گویند، به مجموعه ای از روش های ارزیابی و تعیین خواص دستگاه ها و قطعات ساخته شده گفته می شود که هیچ گونه آسیب یا تغییری در سامانه ایجاد نکنند. آزمون های غیرمخرب به مجموعه روش ها و تست هایی گفته می شود که مقبولیت و سلامتی یک نمونه یا موجودیت را بدون آسیب وارد کردن به آن ارزیابی می کند. آزمون های غیر مخرب دارای کاربرد وسیعی در بسیاری از صنایع هستند. از آن جمله می توان به صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، لوله های نفت و گاز، خودروسازی، هواپیمایی و هوانوردی، راه آهن، نیروگاه های برق و راکتور های هسته ای، قطعات موتور، بدنه، سد سازی، سازه، پی، شبکه های انتقال آب، راه و راه سازی و غیره اشاره نمود [۱].

این روش ها عموماً شامل بازرسی چشمی (VT)، مایع نافذ (PT)، ذرات مغناطیسی (MT)، جریان گردابی (ET)، فرا صوت (UT)، تصویربرداری (RT) می شوند که بسته به نوع میدان و نوع جسم مورد بازرسی یکی از روش ها یا ترکیبی از روش ها انتخاب می گردند. تصویربرداری صنعتی با استفاده از پرتوهای پراکنده که قابلیت نفوذ در عمق ماده را دارند می تواند اثری را با توجه به تضعیفشان در ماده روی یک فیلم حساس یا آشکار ساز های دیجیتال ایجاد کند. پرتوهای یونیزانی که در تصویربرداری صنعتی از آنها بهره برده می شود، پرتوهای گاما و ایکس هستند. پرتوهای گاما حاصل واپاشی ها و گذار های هسته ای رادیو ایزوتوپ ها نظیر کبالت-۶۰، ایریدیوم-۱۹۲ و سزیم-۱۳۷ می باشند. نوع دیگر تابش های یونیزان پرتوهای ایکس هستند که در سال ۱۸۹۵ توسط رونتگن کشف شدند. این پرتو ها توسط تیوب های اشعه ایکس یا شتابدهنده ها، بسته به میزان عمق مورد بررسی و عدد اتمی و چگالی ماده مورد بازرسی، ایجاد می شوند [۲ و ۳].

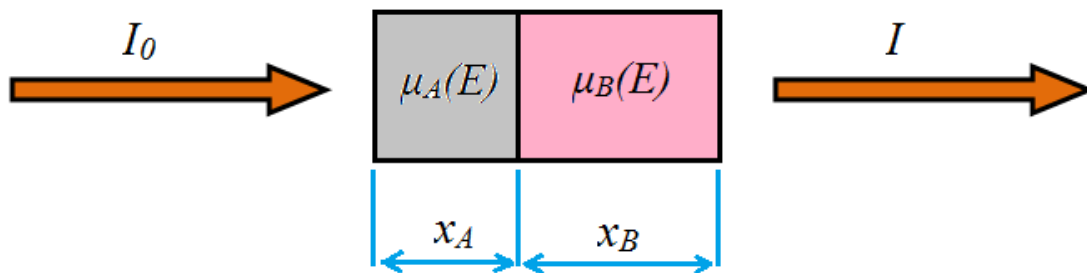
تصویربرداری صنعتی با پرتوی ایکس در میان روش های موجود برای آزمون های غیر مخرب بیشترین استفاده را در میان صنایع مختلف دارد. در روش های متداول تصویربرداری صنعتی با پرتوی ایکس، با استفاده از یک مولد (تیوب) اشعه ایکس با ولتاژهای دو سر آند در حدود ۵۰ تا ۳۰۰ کیلو ولت، بسته به نوع ماده مورد آزمایش، فاصله تا چشمه این



مقدار معین می شود. در حالت عادی با تنظیم انرژی (kVp) روی یک مقدار مشخص، تصویر برداری انجام می گردد که به آن در اصطلاح تصویربرداری تک انرژی (SE) می گویند.

به علت متفاوت بودن ضرایب جذب برای مواد مختلف با عددهای اتمی بالا و پایین نمی توان تفکیک مناسبی برای دو قطعه که در کنار هم قرار دارند قائل شد. تکنیک دو-انرژی (با برخورد کردن از طیف های پرتوی ایکس در دو ناحیه کم انرژی برای مواد با تضعیف خطی کم و پر انرژی برای نواحی با تضعیف خطی بیشتر، راه حلی است که بر این مشکل فائق آمده است. این روش از تصویر برداری پزشکی الگو گرفته است و امروزه به سرعت در حال گسترش در صنایع مختلف می باشد. در رادیولوژی پزشکی برای قفسه سینه برای تفکیک تصاویر استخوان های جناغ سینه با بافت ریه، ماموگرافی برای تفکیک بافت نرم پستان با ذرات میکرو کلسیفیکاسیون که موجب سرطان می شوند از تکنیک دو-انرژی استفاده می نمایند [۳ و ۴].

با استفاده از این تکنیک می توان اطلاعات زیادی از ماده مورد آزمایش کسب نمود. بهترین ویژگی ای که این روش به دست می دهد، بهبود کنتراست تصویر است. با ارائه این نوع از سیستم ها می توان عیوب موجود در ابزارها یا سازه هایی که شامل دو یا چند ماده در کنار هم هستند را به آسانی و همزمان، دریافت و آشکار سازی نمود. همانگونه که در شکل ۱ مشاهده می گردد، با توجه به عبور فوتونهای ایکس از ماده با اعداد اتمی و ضخامت های گوناگون، روابط حاکم بر تضعیف پرتوهای ایکس در روش دو-انرژی در ذیل آورده شده است [۵].



شکل ۱. طرحواره تضعیف فوتونهای پرتوی ایکس در گذار از دو ماده با اعداد اتمی و ضخامت های گوناگون.

$$x_A = \frac{1}{\Delta} \left(\mu_B(E_{HE}) * \ln \left(\frac{I_{0(LE)}(E_{LE})}{I_{LE}(E_{LE})} \right) - \mu_B(E_{LE}) * \ln \left(\frac{I_{0(HE)}(E_{HE})}{I_{HE}(E_{HE})} \right) \right) \quad (1)$$

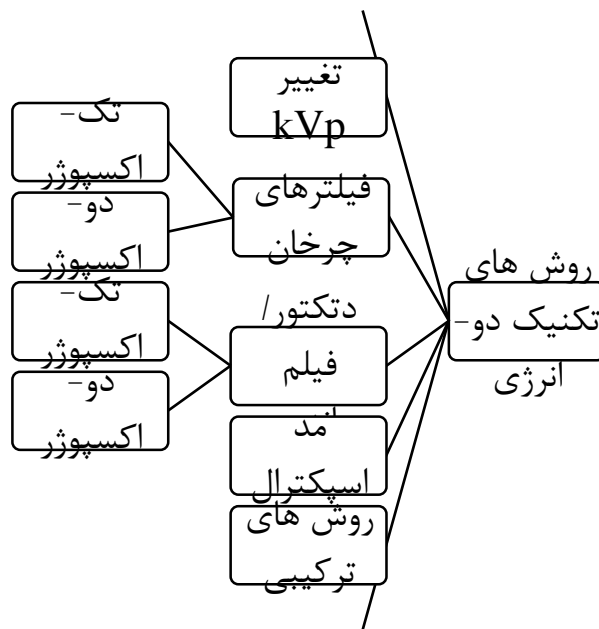


$$x_B = \frac{1}{\Delta} \left(-\mu_A(E_{HE}) * \ln \left(\frac{I_{0(LE)}(E_{LE})}{I_{LE}(E_{LE})} \right) + \mu_A(E_{LE}) * \ln \left(\frac{I_{0(HE)}(E_{HE})}{I_{HE}(E_{HE})} \right) \right) \quad (2)$$

که در آن x_A و x_B به ترتیب ضخامت عبوری از ماده اول و دوم، μ_A و μ_B ضرایب تضعیف خطی، E_{LE} و E_{HE} انرژی بالا و پایین و I_0 و I_{HE} و I_{LE} شار فوتونی ایکس فرودی و عبوری از ماده است. با حل همزمان دو رابطه بالا با دانستن این که $\Delta = \mu_A(E_{LE})\mu_B(E_{HE}) - \mu_A(E_{HE})\mu_B(E_{LE})$ می‌توان سیستم دو-انرژی را که متأثر از ضرایب تضعیف در گستره‌های انرژی فوتون‌های فرودی و عدد اتمی، ضخامت و چگالی‌های مواد مورد بازرسی است، پیاده سازی نمود.

روش کار :

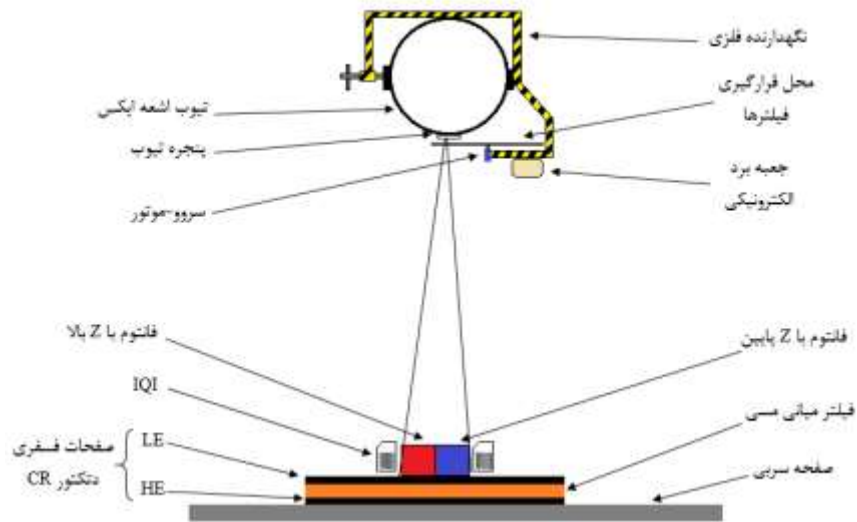
برای پیاده سازی تکنیک دو-انرژی روشهای گوناگونی را پیشنهاد نموده ایم که در شکل شماره ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. روش‌هایی که می‌توان با آن به طور بالقوه به تکنیک دو-انرژی دست یافت.

در این پژوهش روش دو kVp و فیلترهای چرخان با یک پرتو دهی انتخاب گشته است. در این روش فیلتر بالا که در نزدیکی پنجره خروجی تیوب پرتوی ایکس است وظیفه جذب فوتون‌های کم انرژی را که موجب تخریب تصویر و

افزایش نویز می‌گردند، را داراست. فیلتر مسمی پایین لیکن با جذب فوتون های LE که تصویر آنها در آشکار ساز بالا تشکیل می‌گردد، تصویر دیگری را (HE) تولید می‌کند که مشخص کننده مواد با عدد اتمی بالا می‌باشد. در شکل ۲ طرحواره ای از آن مجموعه را به نمایش گذاشته شده است.

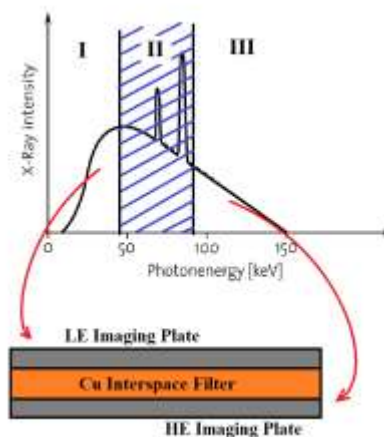


شکل ۳. مجموعه سیستم تصویربرداری با استفاده از پرتوی ایکس دو-انرژی.

فلسفه وجود فیلتر مسمی میانی برش طیف پرتوی ایکس برای ثبت در آشکار سازهای بالا و پایین است. این پیکر بندی فیلتر ساندریچ شده نام گذاری شده است. برای این منظور با استفاده یک طیف پرتوی ایکس به اندازه کافی زیاد که بتوان از دو ناحیه طیفی آن به عنوان LE و HE استفاده نمود همزمان با جریان (mA) مناسب که گستره دینامیکی تصویرمان را ایجاد نماید، بهره برده شده است. نوع آشکار ساز مورد استفاده، از نوع آشکار سازهای دیجیتال حساس به مکان صفحات فسفری CR می‌باشد. برای پیاده سازی تکنیک دو-انرژی در این مجموعه از آشکار ساز CR نوع GP با قدرت تفکیک اسکن لیزر ۵۰ میکرومتر استفاده شده است. این نوع آشکار سازها پس از اکسپوز توسط یک اسکنر لیزری خوانش شده و تصویر دیجیتال استحصال می‌گردد. فیلتر میانی نیز از جنس مس و به ضخامت ۳ میلی متر برای جذب فوتون های LE است.

تصویر استحصال شده با این چینش متاثر از سه ناحیه از طیف است. در شکل ۳ به طور طرحواره نحوه تخصیص نواحی طیف را مشاهده می‌نمایید. در واقع در این پژوهش محققین از یک طیف مشخص پرتوی ایکس استفاده نموده و با استفاده از فیلترها و چینش مناسب آشکار سازهای تصویر، تصویر اصلی را استحصال نمودند.

برای فوتونهای کم انرژی که ضریب تضعیفشان برای اعداد اتمی کم بالاتر است در گوه آلومینیومی جذب می گردند. فوتونهای عبوری از آنها در صورتی که کم انرژی باشند در ناحیه I قرار می گیرند و در آشکارساز بالایی جذب شده و یا در آن انرژی شان به طور کامل می گذارند یا به طور کامل توسط لایه مسی جذب می شوند. در ناحیه II که در حدود انرژی های میانی قرار دارد، بخشی از فوتونها با عبور از فیلتر مسی به صفحه زیرین می رسند و برخی در همان صفحه بالایی قرار می گیرند و اثر می گذارند. در این ناحیه که اصطلاحاً به آن ناحیه همپوشانی نیز می گویند، فوتون ها ممکن است بخشی از انرژی شان را در صفحه بالایی و بخشی را در صفحه پایینی انباشت نمایند. این امر می تواند موجب افزایش پراکندگی و مات شدگی تصویر یا کاهش نسبت سیگنال به نویز گردد. آخرین ناحیه، ناحیه III است که مربوط به فوتونهای بسیار پر انرژی بوده که قدرت نفوذ بالایی دارند و اثر خود را در صفحه زیرین برجای می گذارند. همچنین یک صفحه سربی در زیر آشکارساز LE قرار گرفته است. این امر به دلیل فوتون های پس پراکنده شده هستند که از زمین باز می گردند و اثرات مخربی روی کیفیت تصویر برجای می گذارند.



شکل ۴. تکنیک استحصال فیلم ساندویچ شده با دو اکسپوزر؛ تصویر ناشی از نواحی کم انرژی طیف در صفحه بالایی و تصویر ناحیه پرنرژی طیف در صفحه پایین ایجاد می شود.

برای مشاهده و بررسی رفتار سیستم، از دو فانتوم گوه پله ای با جنس های فولاد آلیاژی ۳۰۴ به عنوان ماده ای با عدد اتمی بالا و یک گوه پله ای آلومینیومی به عنوان نماینده فانتوم با عدد اتمی پایین بهره گرفته شد. در شکل شماره ۴ نحوه قرار گیری آنها در مجموعه تجربی سیستم نشان داده شده است.



شکل ۵. گوه های فولادی و آلومینیوم در کنار هم برای تصویربرداری ایکس دو-انرژی.

تصاویر با استفاده از اسکنر CR ساخت شرکت KODAK با فرمت Diconde که نوعی از Dicom می باشد ذخیره گشت. نرم افزار پردازش تصویر دیجیتال ISee به منظور محاسبه نسبت سیگنال به نویز به خدمت گرفته شد. ROI های معین با تعداد پیکسل های کافی که در استاندارد EN مقدار کافی یک ناحیه با تعدا پیکسل های بیش از ۱۰۰۰ پیکسل تعریف شده است روی هر پله به نحوی گرفته شد که به اندازه کافی هر پله از گوه را پوشش دهد، نسبت سیگنال به نویز نرمالیزه شده (SNR_N) که معیار کیفیت یک تصویر دیجیتال است، بر اساس استاندارد EN-14784 محاسبه گشت. رابطه محاسبه نسبت سیگنال به نویز به طور کلی به صورت رابطه ذیل نمایش داده می شود [۶]:

$$SNR = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \hat{f}(x, y)^2}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2} \quad (3)$$

$f(x, y)$ میانگین تابع اصلی و $f(x, y)$ مقدار دقیق آن تابع دوبعدی است. گاهی رابطه SNR را برای مقاصد عملیاتی، بر حسب دسی بل (db) به شرح رابطه ۲ بیان می کنند.

$$SNR (dB) = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) \quad (4)$$

که در آن P_{signal} سیگنال اصلی ثبت شده روی آشکارساز و P_{noise} میزان نویز آن است. در تصویربرداری صنعتی نسبت سیگنال به نویز اندازه گیری شده ($SNR_{measured}$) به صورت نسبت میانگین سطوح خاکستری (\overline{GV}) در یک ROI به اندازه کافی بزرگ به انحراف معیار (σ) آن ROI تعریف می گردد.

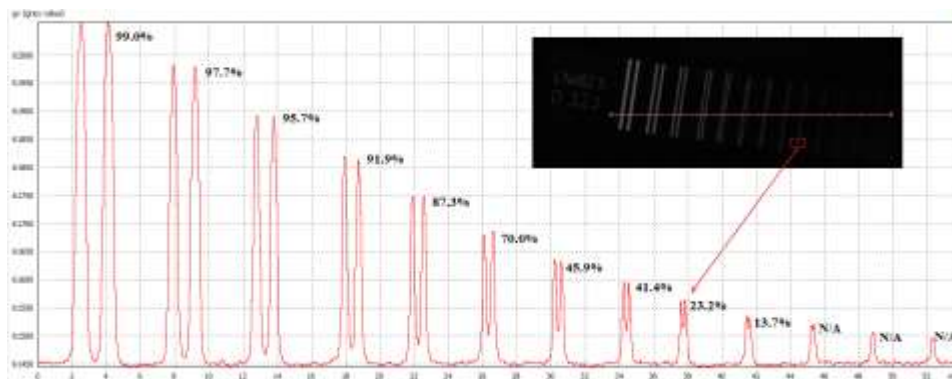
$$SNR_{measured} = \frac{\overline{G.V.}}{\sigma} \quad (5)$$

SNR نرمالیزه شده (SNR_n) معیار مناسبتری است که در آن میزان قدرت تفکیک مکانی پایه (SR_b) آشکارساز نیز در نظر گرفته می شود. رابطه آن به صورت زیر است [۵]:

$$SNR_n = SNR_{measured} \frac{88.6\mu m}{SR_b} \quad (6)$$

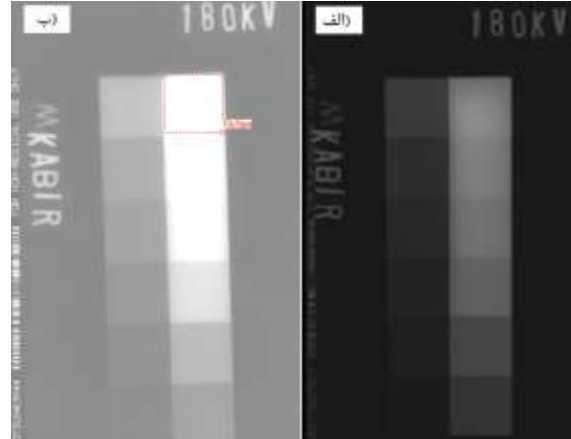
نتایج :

برای به دست آوردن قدرت تفکیک مکانی پایه، از یک IQI داپلکس طبق استاندارد EN-462 4 استفاده نمودیم. با گرفتن یک پروفایل خطی روی تمام خطوط، از ضخیم ترین تا نازک ترین سیم، شماره سیم مورد نظر را تعیین می نماییم. متناظر با هر شماره، قدرت تفکیک مکانی آن تعیین می شود. طبق استاندارد می بایست نسبت اندازه پیک به دره نسبت به کل بیش از ۲۰٪ باشد. اولین سیمی که این مقدار برای آن صدق نماید را به عنوان قدرت تفکیک پایه برمی گزینیم. در اینجا جفت سیم D9 این شرط را برآورده می کند که قدرت تفکیک مکانی آن طبق استاندارد ISO 17636-2 برابر است با ۱۳۰ میکرومتر [۷].



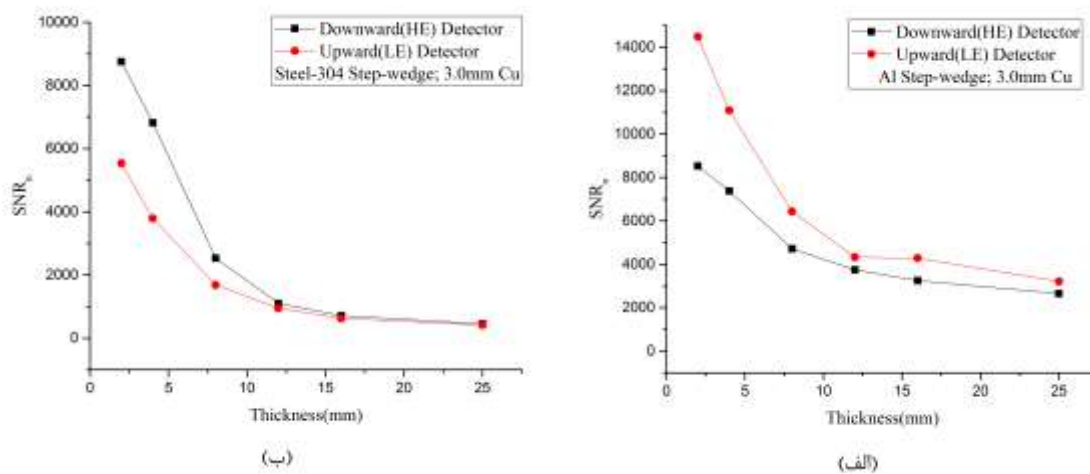
شکل ۶. پروفایل خطی برای اندازه گیری قدرت تفکیک مکانی پایه تصویر.

به ترتیب تصاویر حاصله از آشکار سازهای LE و HE را در شکل ۶، الف و ب مشاهده می نمایید. که برای نمونه یک ROI در شکل ۳-ب نمایش داده شده است.



شکل ۷. رادیوگراف دیجیتال از گوه‌های پله‌ای آلومینیومی و فولادی در ۱۸۰ keV و ۴ mA. الف) بالای فیلتر وب) زیر فیلتر مسی.

در نمودار شکل ۷ الف، نسبت سیگنال به نویز برای گوه آلومینیومی در بالا و پایین فیلتر میانی مسی محاسبه شده است. از نمودار چنین برمی آید که SNR_n در آشکار ساز بالایی بیشتر است. این بدان معناست که انباشت انرژی فوتونهای کم انرژی در این آشکار ساز بیشتر اتفاق افتاده است. در نمودار ب، برای هر ضخامتی، از گوه فولادی در آشکار ساز زیر فیلتر مسی بیشتر است. این به معنای عبور فوتون‌های پرنرژی گذرنده گوه آلومینیومی است و به تبع آن به معنای افزایش ضریب تضعیف خطی در انرژی مزبور در ماده با عدد اتمی بالاتر می باشد.



شکل ۸. مقایسه مقادیر SNR برای گوه پله‌ای الف) آلومینیومی و ب) فولادی در بالا و پایین فیلتر مسی ۳ میلی متری.



بحث و نتیجه گیری :

نتایج به دست آمده در این مقاله، کارایی تکنیک نوین تصویر برداری با استفاده از پرتوهای ایکس دو-انرژی را در آزمون های غیرمخرب برای بازرسی های فنی را نشان داد است. در این مقاله نحوه پیاده سازی آن از طریق روش آشکار ساز های ساندویچ شده با فیلتر میانی مسی با ضخامت ۳ میلی متر نمایش داده شد. نتایج برای گوه های استاندارد فولاد و آلومینیوم در ضخامت های گوناگون نشان داد که میزان SNR نرمالیزه شده روی هر پله، بر اساس معیار های مصرحه در استاندارد های این حوزه برآورده شده است.

مراجع :

- [1] Barry Hull, Vernon John, Non-destructive testing, Macmillan Education LTD, 1988
- [2] W Henning, and C Shank, "Accelerators for America's Future," June Sandbox Studio, Chicago, (2010).
- [3] Boone, John et al, DUAL ENERGY X-RAY IMAGING SYSTEM AND METHOD FOR RADIOGRAPHY AND MAMMOGRAPHY, US patent, 2004
- [4] V. Koukou, N. Martini, C. Michail, P. Sotiropoulou, C. Fountzoula, N. Kalyvas, I. Kandarakis, G. Nikiforidis, and G. Fountos, Dual Energy Method for Breast Imaging: A Simulation Study, Computational and Mathematical Methods in Medicine, Volume 2015, Article ID 574238, 8 pages
- [5] C. L. Lin, C. Hsieh, T. Tserendagva, Miller JD. Dual energy rapid scan radiography for geometallurgy evaluation and isolation of trace mineral particles. Minerals Engineering.40:30-7, 2013.
- [6] British Standard, Non-destructive testing Radiographic inspection of corrosion and deposits in pipes by X- and gamma rays, BS EN 16407-1:2014
- [7] International Standard, Non-destructive testing of welds Radiographic Testing, Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors, ISO 17636-2: 2015