

بررسی کنتراست تصاویر پر تونگاری صنعتی دیجیتال با استفاده از شبیهسازی توسط کد فلوکا

مریم خداکرمی'، بهروز رکرک ^۲، مهدی صالحی باروق*^۱ ۱. گروه مهندسی هستهای، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، صندوق پستی: ۷۶۸–۱۳۱۸۵، تهران– ایران ۲. پژوهشکده راکتور و ایمنی هستهای، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، صندوق پستی: ۱۳۳۹–۱۴۱۵۵، تهران– ایران

> مقالهی پژوهشی تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۳/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۶/۲۶

چکیدہ

روش مونتکارلو بهدلیل توانمندی در شبیهسازی پدیدههای آماری همچون تولید و ترابرد پرتوها و فرآیندهای آشکارسازی یکی از روشهایی است که بهطور گسترده برای شبیهسازی در پرتونگاری صنعتی و پزشکی مورد استفاده قرار می گیرد. پرتونگاری دیجیتال به صورت کاربردی در دو شاخه پرتونگاری محاسباتی (CR) و پرتونگاری صنعتی و پزشکی مورد استفاده میشود. در این پژوهش، شبیهسازی پرتونگاری محاسباتی با سورت کاربردی استفاده میشود. در این پژوهش، شبیهسازی پرتونگاری محاسباتی به سورت کاربردی در دو شاخه پرتونگاری محاسباتی (CR) و پرتونگاری مستقیم (DR) استفاده میشود. در این پژوهش، شبیه سازی پرتونگاری محاسباتی با استفاده از کد مونتکارلوی فلوکا بهمنظور فراهم آوردن بستری برای مطالعه کنتراست تصویر به عنوان یکی از مهم ترین پارامترهای کیفیت تصویر انجام شده است. برای بررسی کنتراست در این تحقیق، یک قطعه استاندارد حساسیت کنتراست از جنس آلومینیم ساخته شده مطابق استاندارد 700 مدور انجام شده است. برای بررسی کنتراست در این تحقیق، یک قطعه استاندارد حساسیت کنتراست از جنس آلومینیم ساخته شده مطابق استاندارد تصاسیت کنتراست از جنس آلومینیم ساخته شده مطابق استاندارد حساسیت کنتراست از جنس آلومینیم ساخته شده مطابق استاندارد محاسیت کنتراست از جنس آلومینیم ساخته شده مطابق استاندارد محاسیت کنتراست از جنس آلومینیم ساخته شده مطابق استاندارد آرفی این قطعه همراه با شبیه ازی کاملی از دستگاه مولد پرتوهای X و صفحات تصویر ساز جهت بررسی کنتراست تصویر انجام شده و روشی برای بررسی کنتراست به منظور تصدیق روش اماندارد آزمایشات عملی بر روی قطعه استاندارد انجام شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی به روش ارایه شده انطباق مناسبی با نتایج ارایه شده آزمایشات عملی دارند.

كليدواژهها: پرتونگاری دیجیتال، كنتراست تصویر، صفحات تصویرساز، حساسیت كنتراست، كد فلوكا

Contrast evaluation of digital industrial radiography images using FLUKA simulation

M. Khodakarami¹, B. Rokrok², M. Salehi Barough^{*1}

1. Department of Nuclear Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, P.O.Box: 13185-768, Tehran-Iran 2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran – Iran

Abstract

Monte Carlo method is widely used for simulation of industrial and medical radiography due to its powerful ability to simulate statistical phenomena such as radiation generation and transport, and detection processes. Digital radiography is practically applied in two branches of computational radiography (CR) and direct radiography (DR). In this study, computational radiography simulation using the FLUKA Monte Carlo code was developed to provide a framework for studying image contrast as one of the most important parameters of image quality. To investigate the contrast a standard aluminum sensitivity component made of ASTM 1647 standard was used. The simulation of this gauge, along with a complete simulation of the X-ray generator and imaging plate, has been done to assess the image contrast, and and a method has been presented to examine the image contrast. In order to validate the proposed method, practical experiments have been carried out on the contrast sensitivity standard gauge. The simulation results obtained through the proposed method are in good agreement with the results of practical experiments.

Keywords: Digital radiography, Contrast, Imaging plate, Contrast sensitivity, FLUKA code

۱. مقدمه

از پرتوهای ایکس و گاما بهطور گستردهای در پرتونگاری صنعتی و پزشکی استفاده میشود. پرتونگاری غالباً به دو روش مبتنی بر فیلم و پرتونگاری دیجیتال استفاده میشود و در روش دیجیتال بهصورت کاربردی خود به دو شاخه پرتونگاری محاسباتی (CR)^۱ و پرتونگاری مستقیم (DR)^۲ تقسیم میشود [۱].

شبيهسازى بهعنوان يك ابزار قدرتمند براى تحليل فرايندها و سیستمها، کاربردهای بسیاری در علوم مختلف یافته است. در سالهای اخیر، برای بررسی و مطالعه جنبههای علمی گوناگونی در حوزه پرتونگاری، از روشهای شبیهسازی بهطور وسيعى استفاده شده است. دليل اصلى براى اين علاقهمندى، پیشرفتهای حاصل در کدهای شبیهسازی و توانایی و اطمینان ایجاد شده در زمینه مطالعه نسبتاً دقیق رفتار سیستمها و همچنین مزیت شبیهسازی در کاهش نیاز به انجام عملی آزمایشات و قرار گرفتن در معرض تشعشع است. روش مونت کارلو بهدلیل توانمندی فوق العاده در شبیه سازی پدیدههای آماری از قبیل تولید و ترابرد پرتوها و نیز فرایندهای آشکارسازی، یکی از روشهایی است که بهطور گسترده برای شبیهسازی و مطالعه جنبههای مختلف پرتونگاری مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله کدهای همه منظوره اصلی که براساس روش مونت کارلو توسعه داده شدهاند، می توان کدهای FLUKA ،MCNP و GEANT را نام برد که در شبیهسازی ترابرد پرتوها و کاربردهای مرتبط، موارد استفاده زیادی داشتهاند.

در زمینه شبیه سازی پرتونگاری با استفاده از کدهای مونت کارلو مطالعات زیادی صورت گرفته است. در فعالیتی که توسط دکتر شهریاری و همکارانش انجام شد [۲]، از کدهای MCNP و FLUKA جهت شبیه سازی طیف اشعه ایکس استفاده شده است. در آن تحقیق نتایج حاصل از کدهای FLUKA و MCNP برای شار فوتونی قبل و بعد از فیلتر محاسبه و در ۴ انرژی مختلف در محدوده کاربرد پزشکی مقایسه شده اند.

در فعالیت دیگری توسط مهدی ثقفی و ناصر وثوقی [۳]، مطالعاتی در زمینه شبیهسازی تصویربرداری با استفاده از کد

MCNP انجام شده است. در این تحقیق محیط تصویربرداری (فیلم یا صفحه تصویرساز) شبیه سازی نشده و از تالی رادیوگرافی برای تصویر سازی استفاده شده است که در شبیه سازی پراکندگی دقت کافی ندارد.

در فعالیت دیگری توسط مسعود عبدالهزاده و حسن نعمتی [۴]، یک دستگاه تولید پرتوی ایکس مدل ۲۶۰-CP ساخت شرکت ICM که از نوع قابل حمل بوده و عمدتاً در مسایل امنیتی از آن استفاده میشود، بهوسیله کد MCNP شبیهسازی شده و اثر فیلتر آلومینیمی روی طیف آن و دز اطراف دستگاه مورد مطالعه قرار گرفته است.

در تحقیق دیگری توسط Correa و همکارانش، شبیهسازی رادیوگرافی محاسباتی توسط کد MCNPX [۵] انجام شده است. برای شبیهسازی صفحات تصویرساز (IP)^۳ در کد MCNPX از مجموعهای از آشکارسازهای نقطهای نزدیک به یکدیگر هستند، استفاده شده است.

در فعالیتی که اخیراً توسط آقای ناظمی و همکاران به چاپ رسیده است، شبیهسازی کاملی از پرتونگاری به روش CR توسط کد MCNP انجام شده است. در این تحقیق، طیف اشعه ایکس در ولتاژهای مورد استفاده در کاربردهای صنعتی محاسبه شده و همچنین قابلیت کد MCNP در شبیهسازی تصویر رادیوگرافی مورد مطالعه قرار گرفته است [۶].

کد مونتکارلوی فلوکا با دارا بودن رابط کاربری مناسب، کاربردهای گستردهای در حوزههای مختلف مهندسی و علوم هستهای دارد. در این تحقیق، از کد فلوکا برای انجام شبیهسازی و مطالعه پرتونگاری صنعتی دیجیتال به روش پرتونگاری محاسباتی استفاده شده است. برای این منظور شبیهسازی کاملی از پرتونگاری شامل مدلسازی دستگاه مولد پرتوهای X، صفحات تصویرساز و یک قطعه استاندارد انجام شده است. بهمنظور اعتبارسنجی نتایج شبیهسازیهای انجام شده، طیف خروجی دستگاه مولد پرتو با نتایج نرمافزار IPEM مقایسه شده است [۷]. در این تحقیق، از قطعه استاندارد تصویر استفاده شده و روشی برای بررسی کنتراست شبیهسازی ارایه گردیده است و نتایج بهدست آمده با آزمایشات تجربی مقایسه شدهاند.

^{1.} Computed Radiography

^{2.} Direct Radiography

^{3.} Image Plate

۲. مواد و روشها

۱.۲ شبیهسازی مونت کارلو و کد فلو کا

روش مونت کارلو اولین بار در سال ۱۹۳۰ توسط فرمی وقتی روش پخش نوترون را مطالعه می کرد استفاده شد، ولی ایشان هیچ مقالهای در این زمینه منتشر نکرد. روش مدرن شبیهسازی مونت کارلو ابتدا توسط اولام (Ulam) در ۱۹۴۰ وقتی در پروژه بمب اتم در آزمایشگاه لوس آلاموس کار می کرد اختراع شد. علاقه شدید این ریاضیدان به بازیهای بر مبنای شانس، این ایده را مطرح کرد که آیا میتوان رفتار فرایند مورد بررسی را به کمک رخدادهای تصادفی تشریح کرد؟ بلافاصله پس از آن نیومن به اهمیت آن پی برد و ENIAC، اولین کامپیوتر ساخته شده، را برای انجام محاسبات آن برنامهریزی كرد. این فعالیتها در گروهی بهصورت محرمانه انجام می شد و نیکلاس متروپلیس، همکار اولام و نیومن، نام مونتکارلو را که تفریگاهی برای بازیهای قمار بود برای این روش پیشنهاد کرد. در مجموعهای از مقالات ارایهشده توسط این گروه پس از اتمام جنگ جهانی دوم ضمن معرفی روش، نکات مختلف آن در حل مسایل مربوط به پروژه منهتن معرفی شد [۸-۱۰].

کد فلوکا یک ابزار مناسب برای محاسبات ترابرد ذرات و پرتوها و برخورد آنها با مواد است و توانایی پوشش گستره وسیعی از انرژی ذرات مختلف را دارد.

این کد توانایی شبیهسازی انواع برخورد و انتشار ذرات (بیش از ۶۰ ذره) با مواد را با دقت بالا دارد [۱۱]. از جمله حوزههای کاربرد این کد میتوان به فیزیک پزشکی، مخصوصاً پرتودرمانی توسط پروتون و نوترون، محاسبات دزیمتری، طراحی منابع پرتوزا، آشکارسازی ذرات، فیزیک رآکتور، حفاظسازی، طراحی شتابدهندهها، تحقیقات در مورد تابشهای کیهانی و ... اشاره کرد.

۲.۲ شبیهسازی پرتونگاری صنعتی

در این تحقیق پرتونگاری دیجیتال به روش محاسباتی با استفاده از مولد پرتو ایکس شبیه سازی شده است. بخشهای اصلی این شبیه سازی شامل مدل سازی مولد پرتو ایکس، صفحه تصویر ساز فسفری، فیلتر و قطعه استاندارد است.

۳.۲ شبیهسازی مولد پر تو ایکس

دستگاه مولد پرتو ایکس مدل CERAM ۲۳۵ (شکل ۱) ساخت شرکت BALTEAU کشور بلژیک [۱۲] توسط کد فلوکا شبیه سازی شده است و طیف اشعه ایکس محاسبه شده با نتایج ۲۸ IPEM نیز مقایسه شدهاند.

جنس هدف^۱ در مولد پرتو CERAM ۲۳۵ از تنگستن و زاویه آن ۲۰ درجه است. ابعاد نقطه کانونی^۲ در این دستگاه ۲×۲ میلیمتر است. در شبیهسازی به جای فیلمان یک چشمه الکترونی در فاصله ۵ سانتیمتری هدف قرار داده شده است. هندسه چشمه به گونهای تعریف شده است که الکترونها به موازات لامپ اشعه ایکس به نقطه کانونی هدف برخورد نمایند. چشمه و هدف داخل یک لامپ خلأ قرار داده شد. جداره لامپ ز جنس بریلیم و به ضخامتی برابر با فیلتراسیون ذاتی تیوب که در برگه مشخصات آن ذکر شده است، برابر با ۱ میلیمتر قرار داده شد. یک فیلتر خارجی نیز در نظر گرفته شد تا اثر فیلتر بر طیف بررسی شود.

هندسه شبیهسازی شده مولد پرتو در شکل ۲ نشان داده شده است. شکل ۳ طرحواره شبیهسازی مولد پرتو ایکس همراه با برشی از مسیر حرکت فوتونهای تولیدی را نشان میدهد.



شکل ۱. تصویر و طرحواره مولد پرتو ایکس CERAM۲۳۵ [۱۲].



1. Target

^{2.} Focal Point



شکل ۳. طرحواره شبیهسازی مولد پرتو ایکس همراه با برشی از مسیر حرکت فوتونهای تولیدی.

۴.۲ شبیهسازی صفحه تصویرساز

برای انجام شبیهسازی کامل پرتونگاری لازم است علاوه بر دستگاه مولد پرتو، صفحه تصویرساز را نیز شبیهسازی کرد. برای شبیهسازی باید جنس لایههای مختلف صفحه تصویرساز و ضخامت آنها بهدقت در کد وارد شوند. صفحه تصویرساز مورد استفاده مربوط به شرکت Care Stream (کداک سابق) است و لایههای مختلف آن در شکل ۴ نشان داده شده است [7].

نتیجه شبیهسازی که پاسخ صفحات تصویرساز نسبت به انرژیهای مختلف پرتوهای ورودی است با محاسبه دز در صفحه تصویرساز از طریق دستور Userbin در کد فلوکا با در نظر گرفتن چشمه فوتون تک انرژی و به ازای انرژی چشمه از ۱ تا ۳۰۰ کیلوالکترونولت محاسبه شده است. میتوان فواصل انرژی را مساوی و برابر یک کیلوالکترونولت در نظر گرفت یا این که فواصل انرژی را حول ۳۷ کیلوالکترونولت کوچک و در حد یک کیلوالکترونولت و در بقیه بازه انرژی بزرگتر و تا حد ۱۰ در نظر گرفت که در این جا از این روش استفاده شده است.

مطابق نتایج نشان داده شده در شکل ۵، صفحات تصویرساز فسفری در انرژیهای حول ۳۰ تا ۸۰ کیلو الکترون ولت دارای حساسیت بیشتری به پرتو دریافتی هستند و پرتوها در این ناحیه دز بیشتری ایجاد میکنند. یعنی اگر فوتون مثلاً ۲۰۰ کیلوالکترونولت به IP تابنده شود در شدت مشابه نسبت به فوتون ۵۰ کیلوالکترونولت، دز کمتری ایجاد میکند. بهعبارتی، اگر فوتون ۲۰۰ کیلوالکترونولت به یک قطعه تابانده شود و با پراکندگی در داخل قطعه مثلاً با انرژی ۵۰ کیلوالکترونولت به ۲۷

نسبت به فوتون ۲۰۰ کیلوولت اولیه در صفحه تصویرساز ایجاد می کند. مطابق نتیجه نشان داده شده در شکل ۵ در پرتونگاری با انرژی زیاد که در قطعات فولادی ناگزیر از آن هستیم، پرتوهای پراکنده شدهای که با انرژی کمتر به IP می سند، دز بالاتری نسبت به پرتوهای اصلی ایجاد می کنند و بنابراین منجر به کاهش شدید کیفیت تصویر می شوند و این امر لزوم به کارگیری حداکثری روشهای کاهش پراکندگی را در پرتونگاری CR نشان می دهد.

۳. نتایج و بحث

۱.۳ محاسبه طيف

نتیجه شبیه سازی طیف خروجی مولد پرتو ایکس توسط کد فلوکا در شکل ۶ نشان داده شده است. این طیف شامل طیف تابش ترمزی و پرتوهای ایکس مشخصه است. خروجی موردنظر کد قبل و بعد از فیلتر خارجی در نقطه عمود بر محل برخورد الکترون به هدف اندازه گیری شد تا طیف اشعه ایکس قبل و بعد از فیلتر محاسبه شود.





شکل ۵. پاسخ دز صفحات IP مورد استفاده در پرتونگاری.



شکل ۶. مقایسه طیف شبیهسازی شده در کد فلوکا با نرمافزار IPEM در . ۱۵۰ kV.

انرژی قطع فوتونها بهصورت پیشفرض keV است. برای حصول دقت کافی در محاسبه طیف لازم است انرژی قطع پرتو در حدود ۱ تا ۵ کیلوالکترونولت تعیین شود. با این کار زمان اجرای برنامه بسیار بیشتر شده ولی طیف با دقت بالایی محاسبه میشود. نتایج حاصل از کد فلوکا با انرژی قطع keV الدون معتبر در این حوزه با نتایج نرمافزار ۲۸ IPEM که از مراجع معتبر در این حوزه است مقایسه شدهاند که نتایج برای ولتاژ kv kV در شکل ۶ نشان داده شده است و همخوانی خوبی بین نتایج قابل مشاهده است.

در کاربردهای صنعتی و برای پرتونگاری قطعات فولادی معمولاً بسته به ضخامت از ولتاژهای ۱۵۰ کیلوولت به بالا استفاده میشود. طیف خروجی دستگاه مولد پرتو برای ولتاژهای ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلو ولت در شکل ۷ نشان داده شدهاند.

۲.۳ بررسی اثر فیلتر

با توجه به این که پرتوهای ایکس کمانرژی در عبور از قطعات، مستعد پراکندگی بیش تری هستند و می توانند وضوح و کیفیت تصویر را کاهش دهند، در بسیاری از کاربردها استفاده از فیلتر با جنس و ضخامت مناسب می تواند به بهبود کیفیت تصاویر کمک کند. در ولتاژهای کم معمولاً از فیلتر استفاده نمی شود، در ولتاژهای میانی از فیلتر آلومینیمی و در ولتاژهای بالا معمولاً از فیلترهای مسی استفاده می شود. اثر فیلتر بر طیف در شکل ۷ نشان داده شده است. در این جا از فیلتر آلومینیمی به ضخامت ۲ mm در ولتاژ لاک ۸۵۰ و فیلتر مسی به ضخامت ضخامت ۸ در ولتاژ ۲۰۰ در دریچه خروجی پرتو از مولد ایکس استفاده شده است. اثر سخت شدن طیف^۲ که به معنی

افزایش متوسط انرژی پرتوهای تولید شده با حذف پرتوهای کمانرژی است، در شکل ۲ قابل مشاهده میباشد.

۳.۳ بررسی کنتراست تصویر

کنتراست تصویر از مهمترین ویژگیهای کیفیت تصویر است. در پرتونگاری صنعتی از قطعات و شاخصهای استاندارد متنوعی بهمنظور ارزیابی و کنترل کیفیت تصویر استفاده میشود که از آن بین میتوان به شاخصهای کیفیت سیمی [۱۳]، پله- سوراخدار [۱۴]، پلاک سوراخدار [۱۵]، جفت سیمی [۱۶] و قطعه استاندارد حساسیت کنتراست [۱۷] اشاره کرد. هر کدام از این ابزارها برای مقصود ویژهای مورد استفاده قرار می گیرند. قطعه استاندارد حساسیت کنتراست برای ارزیابی کنتراست تصویر که از شاخصهای بسیار مهم در قدرت تشخیص عیوب در قطعات است استفاده میشود. شکل ۸ تصویری از قطعه استاندارد حساسیت کنتراست از جنس آلومینیم را نشان میدهد.



شکل ۷. اثر فیلتر بر طیف شبیه سازی شده در کد فلوکا برای (الف) ۱۵۰ کیلوولت و (ب) ۳۰۰ کیلوولت.

(ب)

^{1.} Beam Hardening



شكل ٨. تصوير قطعه استاندارد حساسيت كنتراست از جنس آلومينيم.

در این تحقیق قطعه استاندارد حساسیت کنتراست از جنس آلومینیم شبیهسازی شده است. برای ایجاد تصویری از قطعه باید در صفحه تصویرساز تعداد بسیار زیادی آشکارساز به سایز چند میکرومتر تعریف کرد. این امر باعث می شود زمان شبیهسازی بسیار زیاد شود. در صورتی که بخواهیم تصویر قطعه را بهدست آورده و بررسیها را بر روی آن انجام دهیم ضروری است از پردازندههای قدرتمند و روشهای محاسبات موازی استفاده کنیم. با داشتن محدودیت سرعت پردازنده، یک روش پیشنهادی، انتخاب المانهای تصویر نسبتاً بزرگ است. این کار باعث می شود نتوان نویز سیستم و عوامل مؤثر بر آن را بررسی کرد، اما در بررسی مؤلفه کنتراست تصویر بهدلیل آن که در یک ناحیه موردنظر (ROI)^۱ متوسط گیری انجام می شود، این روش قابل استفاده است. همچنین برای بررسی کنتراست نیازی به شبیه سازی کامل صفحه تصویر ساز نیست و قرار دادن آرایهای از آشکارسازها در امتداد محور مرکزی قطعه استاندارد حساسیت کنتراست می تواند برای این منظور کافی باشد. در این تحقیق از آشکارسازهای به ابعاد ۱×۱ میلیمتر بهصورت خطی و در امتداد محور مرکزی قطعه استفاده شده است و در ولتاژهای ۵۰، ۷۰، ۹۰، ۱۱۰ و ۱۳۰ کیلوولت دز دریافتی صفحه تصویرساز با استفاده از کارت Userbin محاسبه شده و سپس نتایج بهدست آمده در نرمافزار Matlab ترسیم شدهاند. دز محاسبه شده به ازای یک ذره خروجی از چشمه میباشد. شکل ۹ نتیجه شبیهسازی برای محاسبه دز در صفحه تصویرساز توسط کد فلوکا را به صورت خط پروفایل در امتداد محور مركزى قطعه استاندارد كنتراست حساسيت نشان میدهد. بهدلیل این که در انرژیهای مختلف میزان عبور پرتو از

قطعه متفاوت بوده و در نتیجه دزهای متفاوتی در صفحه تصویرساز ایجاد میشود، یک نقطه مکانی از محور مرکزی در صفحه تصویرساز بهعنوان نقطه مشترک مرجع انتخاب شد و مقادیر دز در هر کیلو ولتاژ به عدد دز در آن نقطه تقسیم شد تا حدود مقادیر دز در ولتاژهای مختلف به یکدیگر نزدیک شده و نمایش بصری مناسبتری از مقادیر دز ایجاد شود (در نقطه مرجع انتخاب شده، همه نمودارها دارای مقدار ۱ هستند).

کنتراست به انرژی پرتو وابسته است و با افزایش ولتاژ کاهش مییابد. دلیل این امر به ارتباط کنتراست با ضریب تضعیف که خود به انرژی پرتو وابسته است مربوط می شود و با روابط زیر قابل حصول است:

$$I_{\rm N} = B J_{\rm o} . Exp(-\mu x) \tag{1}$$

- $I_{x} = B \cdot I_{a} \cdot Exp(-\mu \cdot (x dx)) \tag{7}$
- $SC = (I_x I_y) / I_x = y Exp(-\mu dx)$ (7)

 I_{1} میزان پرتو در ناحیه یکنواخت قطعه و I_{7} میزان پرتو در زیر ناحیه فرورفتگی به میزان dx و μ ضریب تضعیف خطی قطعه است و SC نوعی از کنتراست است که کنتراست شی⁷ نامیده می شود [۱۸]. چگونگی تغییر کنتراست شی با تغییر ولتاژ در نواحی با فرورفتگیهای ۱ تا ۴ درصد قطعه در استاندارد حساسیت کنتراست، از طریق شبیه سازی و با استفاده از فرمول ۳. با متوسط گیری در هر ناحیه، محاسبه شده و در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



2. Subject Contrast

^{1.} Region of Interest



شکل ۱۱. تصاویر پرتونگاری قطعه استاندارد حساسیت کنتراست از جنس آلومینیم پرتونگاریشده در ولتاژهای الف)۷۰، ب)۹۰، ج)۱۱۰ و د) ۱۳۰ کیلوولت.

که در آن K دز بر حسب رونتگن و EI همان مقدار خاکستری است. این رابطه برای سیستم CR مورد استفاده در آزمایشات عملی این تحقیق که یک سیستم ۱۲ بیتی است قابل استفاده میباشد. کنتراست تصویر که به صورت اختلاف بین سطوح خاکستری دو ناحیه مجاور هم است با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$IC = (GV_{r} - GV_{r})/GV_{r}$$
 (a)

اندیسها برای نمایش دو ناحیه مجاور و *IC* کنتراست تصویر است. برای ساده شدن محاسبه کنتراست تصویر، سطح خاکستری را با قرار دادن ۱۰۰ log ۱۰۰ به جای ۲۰۰۰ در رابطه ۴ به فرم زیر تبدیل میکنیم.

$$GV = 1 \cdots log \ 1 \cdots K$$
 (9)



شکل ۱۰.کنتراست شی محاسبه شده در شبیه سازی با کد فلوکا.

قطعه استاندارد حساسیت کنتراست که شبیهسازی آن انجام شده است، با استفاده از سیستم CR موجود در آزمایشگاه NDT مرکز نظام ایمنی هستهای کشور، با پارامترها و تنظیمات زیر بهمنظور بررسی تأثیر ولتاژ بر کنتراست، پرتونگاری شده است و تصاویر حاصل از پرتونگاری در ولتاژهای پرتونگاری ۱۱۰ و ۱۳۰ کیلوولت در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

Sfd= \...cm IP: GP Laser Power: Low Laser Spot Size: Δ. micrometer PMT Gain: ۳.

در تصاویر شکل ۱۱ (نتایج آزمایشات عملی)، به صورت چشمی می توان روند کاهش کنتراست با افزایش ولتاژ را مشاهده نمود. کنتراست محاسبه شده در شبیه سازی که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، کنتراست شی است. در آزمایشات عملی کنتراست تصویر^۱ که اختلاف اندازه سطوح خاکستری^۲ در دو ناحیه مجاور هم است، محاسبه می شود. به بیان دیگر، در آزمایشات عملی برای هر نقطه از تصویر، سطح خاکستری تعیین می شود، این در حالی است که در شبیه سازی می توان شار یا دز را محاسبه کرد. ارتباط بین دز و اندازه خاکستری در یک سیستم CR می تواند از یک سیستم به سیستم دیگر متفاوت باشد و در واقع یکی از مشخصه های سیستم RT است که توسط طراح و سازنده تعیین می شود. این ارتباط در سیستم Care Stream به می داده شده است [19]:

$$EI = \dots logK + \dots$$
 (*)

^{1.} Image Contrast

^{2.} Gray Value

با جایگذاری در رابطه ۵ کنتراست تصویر بهصورت زیر محاسبه میشود:

$$IC = \log \left(\cdot \cdot K_{\gamma} / \log \left(\cdot \cdot K_{\gamma} - \right) \right)$$
(Y)

مقادیر کنتراست تصویر حاصل از شبیه سازی با استفاده از رابطه ۷ و نتایج آزمایشات عملی حاصل از رابطه ۵ در قطعه استاندارد حساسیت کنتراست محاسبه و نتایج در جدول ۱ نشان داده شدهاند. برای محاسبه کنتراست در آزمایشات عملی از انتخاب یک ROI دایرهای در مرکز هر فرورفتگی در قطعه استاندارد و ناحیه مجاور تا فرورفتگی بعدی استفاده شده است. در مورد شبیهسازیها از متوسط گیری روی ۵ نقطه میانی هر فرورفتگی و فاصله تا فرورفتگی بعدی استفاده شده است. نتایج نشان میدهند که اختلاف بین نتایج شبیهسازی انجامشده در این تحقیق و نتایج آزمایشات عملی در بیشترین مقدار که مربوط به ناحیه ۱٪ است، کمتر از ۱۵٪ است و در دیگر نواحی به زیر ٪۱۰ و در برخی نقاط حتی تا ٪۱ هم میرسد که نشان از توافق خوب بین کنتراست حاصل از شبیهسازی ارایه شده با نتایج آزمایشات عملی است. بنابراین از روش شبیهسازی ارایه شده در این تحقیق می توان در پر تونگاری CR و ارزیابی كنتراست تصوير بهعنوان يكي از مهمترين عوامل مؤثر بر كيفيت تصوير استفاده كرد. نتايج محاسبه كنتراست تصوير با استفاده از روش شبیهسازی ارایه شده و نتایج آزمایشات عملی انجام شده در شکل ۱۲ نشان داده شدهاند.

جدول ۱. نتایج حاصل از محاسبه کنتراست تصویر در شبیه سازی (Sim) و آزمایشات عملی (Exp) بر روی شاخص کیفیت حساسیت کنتراست (درصد)

								,
۱۳۰ kV		۱۱۰ kV		۹۰ kV		٧٠ kV		
Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	
۰٫۷۱	۰٫۷۳	• , YY	۰٬۸۲	۰٫۹۱	۰٫۹۸	١٫٢٣	١٫٢۵	ناحيه
								۴%
٠٫۵٨	۰٫۵۹	۰٫۶۵	۶۷، ۲	•,٧٧	٠٫٧٧	١٬٠۴	۰,۹۸	ناحيه
								۳٪.
٠٫٣٣	۰,۲۹	•,*•	۰٫۳۸	•,۴٧	•,48	۰٫۵۷	۰,۵۴	ناحيه
								۲٪.
٠٫١٧	۰٫۱۵	•,٢١	۰٫۱۹	۰٫۲۵	•,٢۶	• ,٣٢	٠٫٢٧	ناحبه
								 \`/
								. /.





شکل ۱۲. نتایج محاسبه کنتراست تصویر: الف) شبیهسازی ب) آزمایشات تجربی و مقایسه با نتایج عملی.

۴. نتیجهگیری

در این تحقیق شبیهسازی پرتونگاری صنعتی دیجیتال به روش پرتونگاری محاسباتی، با استفاده از کد مونتکارلوی فلوکا، برای مطالعه پرتونگاری و بررسی کنتراست تصویر انجام شده است. برای این منظور سیستم کامل پرتونگاری شامل دستگاه مولد پرتوهای X مدل CERAM ۲۳۵، صفحات تصویرساز و قطعه استاندارد حساسیت کنتراست شبیهسازی شدهاند. بهمنظور بررسی صحت شبیهسازی مولد پرتو، طیف حاصل از شبیه سازی انجام شده توسط کد فلوکا با نتایج نرمافزار IPEM مقایسه شده است که از همخوانی مناسبی برخوردار است. برای انجام شبیهسازی کامل پرتونگاری علاوه بر دستگاه مولد پرتو، صفحه تصویرساز نیز شبیهسازی شده است تا با استفاده از آن بتوان دز دریافتی آن را محاسبه کرد. در این تحقیق بهمنظور بررسی کنتراست تصویر، یک قطعه استاندارد حساسیت کنتراست از جنس آلومینیم شبیهسازی شده است. در صورتی که بخواهیم تصویر قطعه را بهدست آورده و بررسیها را بر روی آن انجام دهیم، به دلیل زمانبری بسیار زیاد شبیهسازی، لازم

- 4. M. Abdollahzadeh, H. Nemati, *Determination of the dose of portable X-ray generator using the MCNP simulation code and its comparison with experimental values*, First International Conference of Physics and Mathematics (2015) (In Persian).
- 5. S.C.A. Correa, et al, *Computed radiography* simulation using the Monte Carlo code MCNPX, Applied Radiation and Isotopes, **68** (9), 1662 (2010).
- 6. E. Nazemi, et al, Simulation of A Complete Xray digital radiographic system for Industrial Application, Applied Radiation and Isotopes, **139**, 294 (2018).
- 7. IPEM Report No. 78, *Catalogue of Diagnostic X-ray Spectra and other data*, Institute of Physics and Engineering in Medicine (1997).
- 8. N. Metropolis, S. Ulam, *The Monte Carlo Method*, Journal of the American Statistical Association, **44**(247), 335-341 (1949).
- 9. N. Metropolis, *The beginning of the Monte Carlo method*, Los Alamos Science, 125-130 (1987).
- 10. Wikipedia, *Monte Carlo Method* (2018).
- 11. Official FLUKA Site, FLUKA Manual, www.fluka.org (2018).
- 12. Balteau NDT, *BALTOSPOT-CERAM* 235, www.balteau.com (2018).
- 13. ISO 19232-1, Non-destructive testing -- Image quality of radiographs -- Part 1: Determination of the image quality value using wire-type image quality indicators, (International Standard Organization, 2013).
- 14. ISO 19232-2, Non-destructive testing -- Image quality of radiographs -- Part 2: Determination of the image quality value using step/hole-type image quality indicators, (International Standard Organization, 2013).
- 15. ASTM E1025, Standard Practice for Design, Manufacture, and Material Grouping Classification of Hole-Type Image Quality Indicators (IQI) Used for Radiography, (American Society for Testing Materials, 2018).
- 16. ISO 19232-5, Non-destructive testing -- Image quality of radiographs -- Part 5: Determination of the image unsharpness and basic spatial resolution value using duplex wire-type image quality indicators, (International Standard Organization, 2018).
- 17. ASTM E1647, Standard Practice for Determining Contrast Sensitivity in Radiology, (American Society for Testing Materials, 2016).
- Bushberg, et al, *The Essential Physics of Medical Imaging*, (Lippincott Williams, 2002).
- 19. AAPM REPORT NO. 93, Acceptance Testing and Quality Control of Photostimulable Storage Phosphor Imaging Systems, (Report of AAPM Task Group 10, October 2006).

است از پردازندههای قدرتمند و تکنیکهای محاسبات موازی استفاده کنیم. به جهت زمانبری بسیار بالای محاسبات کد، در این تحقیق به جای ایجاد تصویر کامل، شبیهسازی برای تعیین خط یروفایل انجام شده است که می تواند در تحلیل های مورد نیاز استفاده شود. با استفاده از روابطی که روش استخراج آنها نشان داده شده است، می توان نتایج شبیه سازی (دز) را به سطح خاکستری (برای مقایسه با نتایج آزمایشات تجربی) تبدیل کرد. در این تحقیق کنتراست تصویر پرتونگاری در ولتاژهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و با روابطی که نشان داده شد کنتراست تصویر حاصل از نتایج شبیهسازی محاسبه و با نتایج آزمایشات عملی مقایسه شد که مشخص گردید توافق خوبی بین نتایج شبیهسازی و عملی برقرار است. در ناحیه ٪۱ قطعه کنتراست تصویر، بیشترین اختلاف بین نتایج شبیهسازی و نتایج عملی وجود دارد که در بیشترین مقدار خود به حدود ٪۱۵ می سد. البته بخشی از این اختلاف به کاهش دقت آزمایشات عملی در ناحیه ٪۱ برمی گردد. در دیگر نواحی اختلاف کمتر از ٪۱۰ و در مواردی نیز در حدود ./۱ است.

تشكر و قدرداني

از همکاری کارکنان آزمایشگاه آزمونهای غیرمخرب مرکز نظام ایمنی هستهای سازمان انرژی اتمی ایران در انجام آزمایشات عملی پرتونگاری دیجیتال CR تشکر و قدردانی میشود.

مراجع

- 1. ASME Section V, Article 2, *Radiographic Examination*, (American Society of Mechanical Engineers, 2019).
- R. Talei, M. Shahriari, S.M. Aghamiri, *Qualitative study of FLUKA software in simulation and design of X-ray rays obtained from X-ray tube*, Iranian Journal of Medical Physics, 3(12) (2006) (In Persian).
- 3. M. Saghafi, N. Vosoughi, Simulation of X-ray Imaging of Industrial Parts using the Monte Carlo Method, 4th Conference on Machine Tracking and Troubleshooting, Sharif University of Technology, Tehran, Iran (2009) (In Persian).