

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

مریم خداکریمی^۱، بهروز رکرک^۲، مهدی صالحی باروق^{*۱}

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، صندوق پستی: ۱۳۱۸۵-۷۶۸، تهران - ایران
۲. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۳/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۶/۲۶

چکیده

روش مونت کارلو به دلیل 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 می‌گیرد. پرتونگاری دیجیتال به صورت کاربردی در دو شاخه پرتونگاری محاسباتی (CR) و پرتونگاری مستقیم (DR) استفاده می‌شود. در این پژوهش، شبیه‌سازی پرتونگاری محاسباتی با استفاده از کد مونت کارلوی فلوکا به‌منظور فراهم آوردن بستری برای مطالعه کنتراست تصویر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفیت تصویر انجام شده است. برای بررسی کنتراست در این تحقیق، یک قطعه استاندارد حساسیت کنتراست از جنس آلومینیم ساخته شده مطابق استاندارد ASTM 1647 مورد استفاده قرار گرفته است. شبیه‌سازی این قطعه همراه با شبیه‌سازی کاملی از دستگاه مولد پرتوهای X و صفحات تصویرساز جهت بررسی کنتراست تصویر انجام شده و روشی برای بررسی کنتراست تصویر ارائه گردیده است. به‌منظور تصدیق روش ارائه شده آزمایشات عملی بر روی قطعه استاندارد انجام شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش ارائه شده انطباق مناسبی با نتایج آزمایشات عملی دارند.

کلیدواژه‌ها: پرتونگاری دیجیتال، کنتراست تصویر، صفحات تصویرساز، حساسیت کنتراست، کد فلوکا

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, AEOL, 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 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

*Email: m.s.barough@gmail.com

۱. مقدمه

از پرتوهای ایکس و گاما به طور 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 به صورت کاربردی خود به دو شاخه پرتونگاری محاسباتی (CR)^۱ و پرتونگاری مستقیم (DR)^۲ تقسیم می‌شود [۱].

شبیه‌سازی به عنوان یک ابزار قدرتمند برای تحلیل فرایندها 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 به طور وسیعی استفاده شده است. دلیل اصلی برای این علاقه‌مندی، 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 مونت‌کارلو به دلیل توانمندی فوق‌العاده در شبیه‌سازی پدیده‌های آماری از قبیل تولید و ترابرد پرتوها و نیز فرایندهای آشکارسازی، یکی از روش‌هایی است که به طور گسترده برای شبیه‌سازی و مطالعه جنبه‌های مختلف پرتونگاری مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله کدهای همه منظوره اصلی که براساس روش مونت‌کارلو توسعه داده شده‌اند، می‌توان کدهای MCNP، FLUKA و GEANT را نام برد که در شبیه‌سازی ترابرد پرتوها و کاربردهای مرتبط، موارد استفاده زیادی داشته‌اند.

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

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) شبیه‌سازی نشده و از تالی رادیوگرافی برای تصویرسازی استفاده شده است که در شبیه‌سازی پراکندگی دقت کافی ندارد.

در فعالیت دیگری توسط مسعود عبداله‌زاده و حسن نعمتی [۴]، یک دستگاه تولید پرتوی ایکس مدل CP-۱۶۰ ساخت شرکت ICM که از نوع قابل حمل بوده و عمدتاً در مسایل امنیتی از آن استفاده می‌شود، به وسیله 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. به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده، طیف خروجی دستگاه مولد پرتو با نتایج نرم‌افزار IPEM مقایسه شده است [۷]. در این تحقیق، از قطعه استاندارد حساسیت کنتراست از جنس آلومینیم برای بررسی کنتراست تصویر استفاده شده و روشی برای بررسی کنتراست تصویر در شبیه‌سازی ارائه گردیده است و نتایج به دست آمده با آزمایشات تجربی مقایسه شده‌اند.

1. Computed Radiography
2. Direct Radiography

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲ شبیه‌سازی مونت کارلو و کد فلوکا

روش مونت کارلو اولین بار در سال ۱۹۳۰ توسط فرمی وقتی روش پخش نوترون را مطالعه می‌کرد 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 می‌کرد 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 کرد. این فعالیت‌ها در گروهی به صورت محرمانه انجام می‌شد و نیکلاس متروپولیس، همکار اولام و نیومن، نام مونت کارلو را که تفریگاهی برای بازی‌های قمار بود برای این روش پیشنهاد کرد. در مجموعه‌ای از مقالات ارائه شده توسط این گروه پس از اتمام جنگ جهانی دوم ضمن معرفی روش، نکات مختلف آن در حل مسایل مربوط به پروژه منتهن 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، حفاظت‌سازی، طراحی شتاب‌دهنده‌ها، تحقیقات در مورد تابش‌های کیهانی و ... اشاره کرد.

۲.۲ شبیه‌سازی پرتونگاری صنعتی

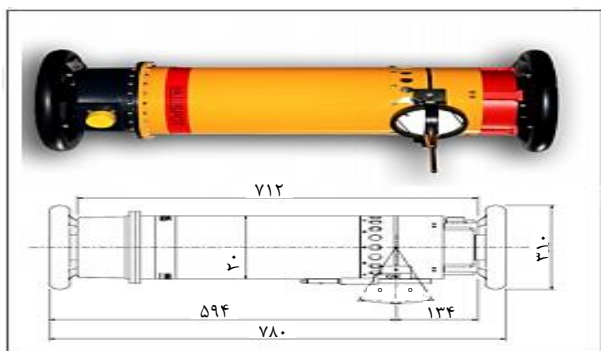
در این تحقیق پرتونگاری دیجیتال به روش محاسباتی با استفاده از مولد پرتو ایکس شبیه‌سازی شده است. بخش‌های اصلی این شبیه‌سازی شامل مدل‌سازی مولد پرتو ایکس، صفحه تصویرساز فسفری، فیلتر و قطعه استاندارد است.

۳.۲ شبیه‌سازی مولد پرتو ایکس

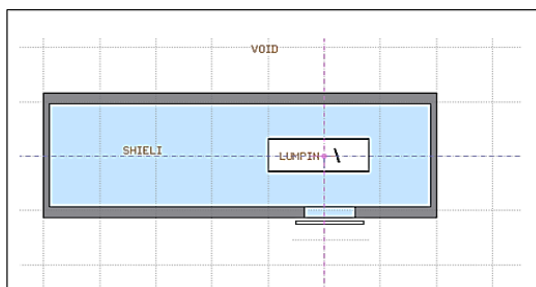
دستگاه مولد پرتو ایکس مدل CERAM ۲۳۵ (شکل ۱) ساخت شرکت BALTEAU کشور بلژیک [۱۲] توسط کد فلوکا شبیه‌سازی شده است و طیف اشعه ایکس محاسبه شده با نتایج IPEM ۷۸ نیز مقایسه شده‌اند.

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 از جنس بریلیم و به ضخامت 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.



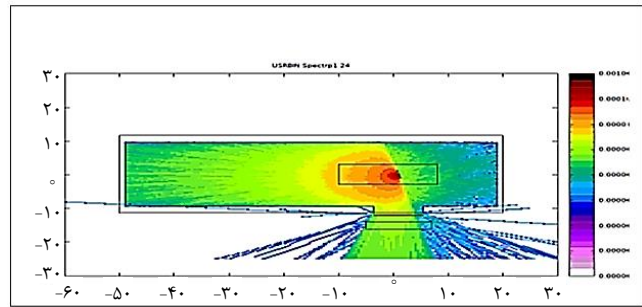
شکل ۱. تصویر و طرح‌واره مولد پرتو ایکس CERAM ۲۳۵ [۱۲].



شکل ۲. هندسه شبیه‌سازی شده مولد پرتو در کد فلوکا.

1. Target
2. Focal Point

نسبت به فوتون ۲۰۰ کیلوولت اولیه در صفحه تصویرساز ایجاد می‌کند. 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 می‌رسند، دز بالاتری نسبت به پرتوهای اصلی ایجاد می‌کنند و بنابراین منجر به کاهش شدید کیفیت تصویر می‌شوند و این امر لزوم به‌کارگیری حداکثری روش‌های کاهش پراکندگی را در پرتونگاری CR نشان می‌دهد.



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 [۶].

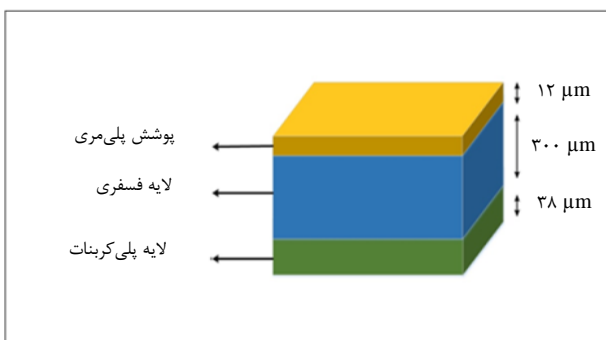
نتیجه شبیه‌سازی که پاسخ صفحات تصویرساز نسبت به انرژی‌های مختلف پرتوهای ورودی است با محاسبه دز در صفحه تصویرساز از طریق دستور Userbin در کد فلوکا با در نظر گرفتن چشمه فوتون تک انرژی و به ازای انرژی چشمه از ۱ تا ۳۰۰ کیلوالکترون‌ولت محاسبه شده است. می‌توان فواصل انرژی را مساوی و برابر یک کیلوالکترون‌ولت در نظر گرفت یا این‌که 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 این‌جا از این روش استفاده شده است. نتیجه این محاسبات در شکل ۵ نشان داده 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. به عبارتی، اگر فوتون ۲۰۰ کیلوالکترون‌ولت به یک قطعه تابنده شود و با پراکندگی در داخل قطعه مثلاً با انرژی ۵۰ کیلوالکترون‌ولت به IP برسد، این پرتو پراکنده دز بیشتری

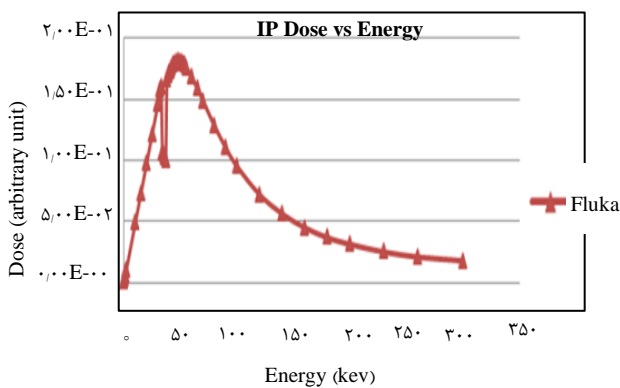
۳. نتایج و بحث

۱.۳ محاسبه طیف

نتیجه شبیه‌سازی 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 اندازه‌گیری شد تا طیف اشعه ایکس قبل و بعد از فیلتر محاسبه شود.



شکل ۴. اجزای سازنده فیلم CR.

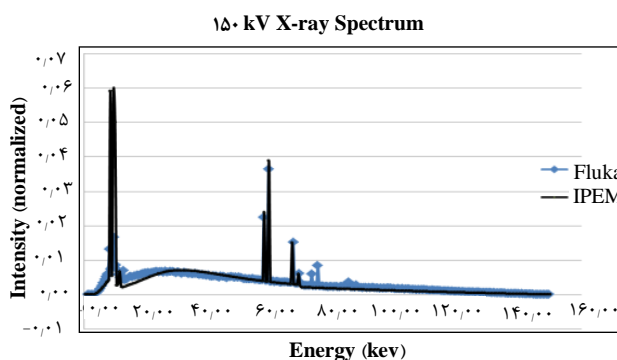
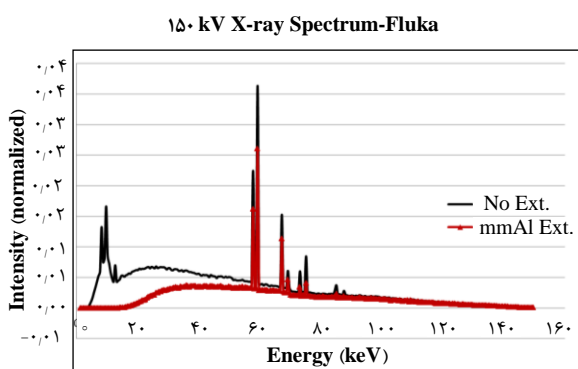


شکل ۵. پاسخ دز صفحات IP مورد استفاده در پرتونگاری.

افزایش متوسط انرژی پرتوهای تولید شده با حذف پرتوهای کم انرژی است، در شکل ۷ قابل مشاهده می باشد.

۳.۳ بررسی کنتراست تصویر

کنتراست تصویر از مهم ترین ویژگی های کیفیت تصویر است. در پرتونگاری صنعتی از قطعات و شاخص های استاندارد متنوعی به منظور ارزیابی و کنترل کیفیت تصویر استفاده می شود که از آن بین می توان به شاخص های کیفیت سیمی [۱۳]، پله- سوراخ دار [۱۴]، پلاک سوراخ دار [۱۵]، جفت سیمی [۱۶] و قطعه استاندارد حساسیت کنتراست [۱۷] اشاره کرد. هر کدام از این ابزارها برای مقصود ویژه ای مورد استفاده قرار می گیرند. قطعه استاندارد حساسیت کنتراست برای ارزیابی کنتراست تصویر که از شاخص های بسیار مهم در قدرت تشخیص عیوب در قطعات است استفاده می شود. شکل ۸ تصویری از قطعه استاندارد حساسیت کنتراست از جنس آلومینیوم را نشان می دهد.



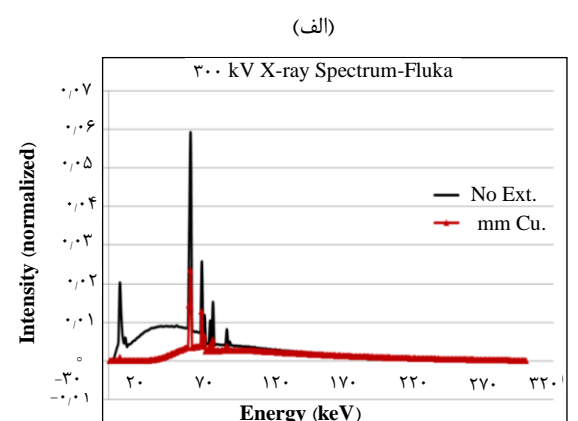
شکل ۶. مقایسه طیف شبیه سازی شده در کد فلوکا با نرم افزار IPEM در ۱۵۰ kV.

انرژی قطع فوتون ها به صورت پیش فرض ۳۷ keV است. برای حصول دقت کافی در محاسبه طیف لازم است انرژی قطع پرتو در حدود ۱ تا ۵ کیلو الکترون ولت تعیین شود. با این کار زمان اجرای برنامه بسیار بیش تر شده ولی طیف با دقت بالایی محاسبه می شود. نتایج حاصل از کد فلوکا با انرژی قطع ۱ keV با نتایج نرم افزار IPEM ۷۸ که از مراجع معتبر در این حوزه است مقایسه شده اند که نتایج برای ولتاژ ۱۵۰ kV در شکل ۶ نشان داده شده است و هم خوانی خوبی بین نتایج قابل مشاهده است.

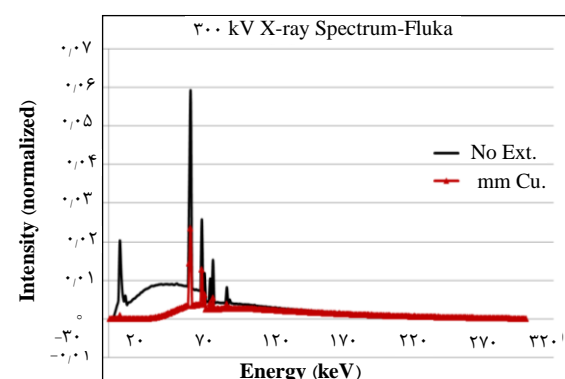
در کاربردهای صنعتی و برای پرتونگاری قطعات فولادی معمولاً بسته به ضخامت از ولتاژهای ۱۵۰ کیلوولت به بالا استفاده می شود. طیف خروجی دستگاه مولد پرتو برای ولتاژهای ۱۵۰ و ۳۰۰ کیلوولت در شکل ۷ نشان داده شده اند.

۲.۳ بررسی اثر فیلتر

با توجه به این که پرتوهای ایکس کم انرژی 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 آلومینیومی 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 آلومینیومی به ضخامت ۲ mm در ولتاژ ۱۵۰ kV و فیلتر مسی به ضخامت ۰.۵ mm در ولتاژ ۳۰۰ kV در درجه خروجی پرتو از مولد ایکس استفاده شده است. اثر سخت شدن طیف^۱ که به معنی



(الف)



(ب)

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

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).

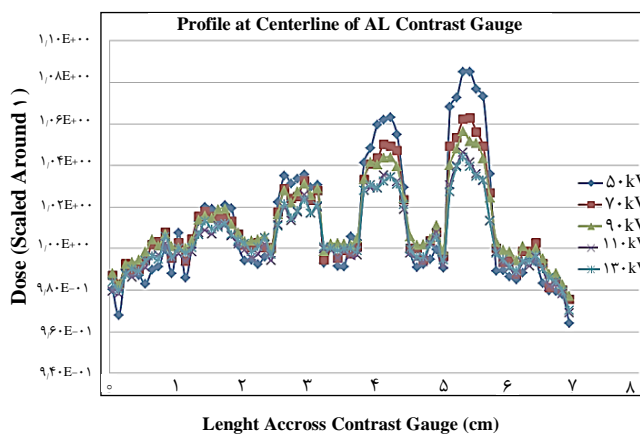
کنتراست به انرژی پرتو وابسته است و با افزایش ولتاژ کاهش می‌یابد. دلیل این امر به ارتباط کنتراست با ضریب تضعیف که خود به انرژی پرتو وابسته است مربوط می‌شود و با روابط زیر قابل حصول است:

$$I_1 = B \cdot I_0 \cdot \text{Exp}(-\mu x) \quad (1)$$

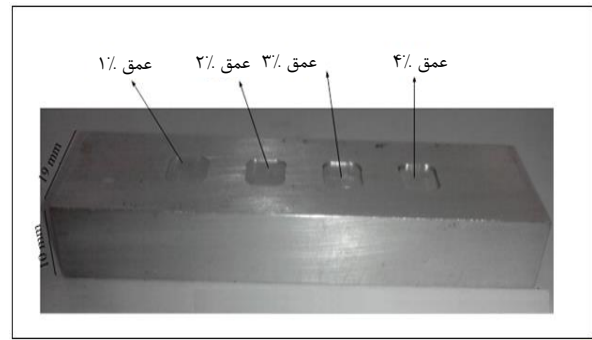
$$I_2 = B \cdot I_0 \cdot \text{Exp}(-\mu \cdot (x - dx)) \quad (2)$$

$$SC = (I_2 - I_1) / I_2 = 1 - \text{Exp}(-\mu dx) \quad (3)$$

I_1 میزان پرتو در ناحیه یکنواخت قطعه و I_2 میزان پرتو در زیر ناحیه فرورفتگی به میزان dx و μ ضریب تضعیف خطی قطعه است و SC نوعی از کنتراست است که کنتراست شی^۲ نامیده می‌شود [۱۸]. چگونگی تغییر کنتراست شی با تغییر ولتاژ در نواحی با فرورفتگی‌های ۱ تا ۴ درصد قطعه در استاندارد حساسیت کنتراست، از طریق شبیه‌سازی و با استفاده از فرمول ۳، با متوسط‌گیری در هر ناحیه، محاسبه شده و در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹. خط پروفایل دز در امتداد محور مرکزی قطعه استاندارد حساسیت کنتراست.

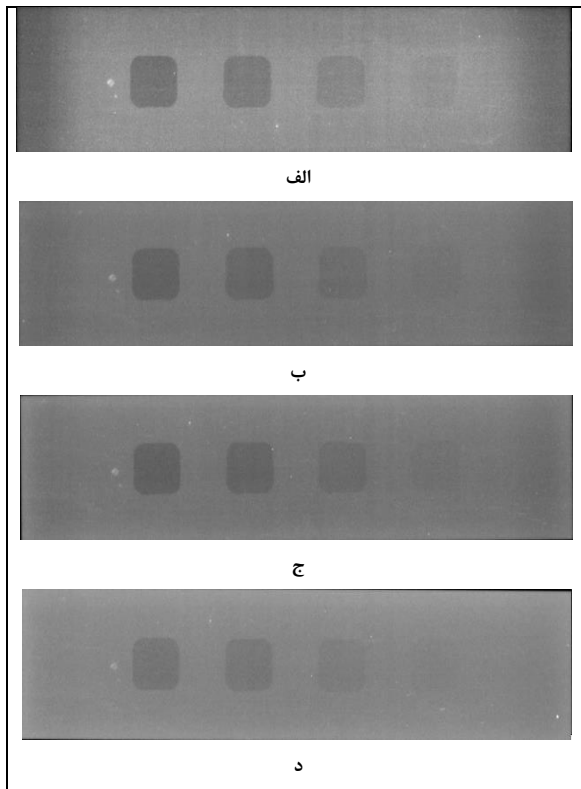


شکل ۸. تصویر قطعه استاندارد حساسیت کنتراست از جنس آلومینیم.

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 می‌شود 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 می‌شود 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 متوسط‌گیری انجام می‌شود، این روش قابل استفاده است. هم‌چنین برای بررسی کنتراست نیازی به شبیه‌سازی کامل صفحه تصویرساز نیست و قرار دادن آرایه‌ای از آشکارسازها در امتداد محور مرکزی قطعه استاندارد حساسیت کنتراست می‌تواند 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 محاسبه‌شده به ازای یک ذره خروجی از چشمه می‌باشد. شکل ۹ نتیجه شبیه‌سازی برای محاسبه دز در صفحه تصویرساز توسط کد فلوکا را به‌صورت خط پروفایل در امتداد محور مرکزی قطعه استاندارد کنتراست حساسیت نشان می‌دهد. به‌دلیل این که در انرژی‌های مختلف میزان عبور پرتو از

1. Region of Interest

2. Subject Contrast



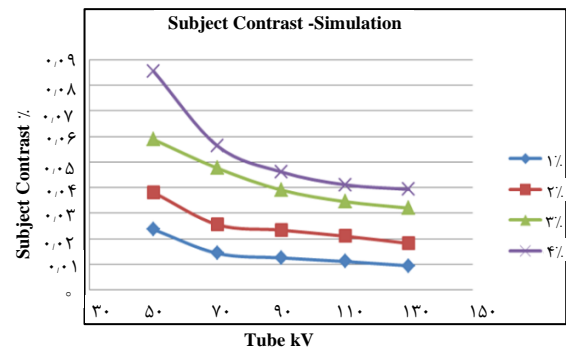
شکل ۱۱. تصاویر پرتونگاری قطعه استاندارد حساسیت کنتراست از جنس آلومینیم پرتونگاری شده در ولتاژهای الف (۷۰، ب) ۹۰، ج) ۱۱۰ و د) ۱۳۰ کیلوولت.

که در آن K دز بر حسب روننگن 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:

$$IC = (GV_p - GV_s) / GV_s \quad (5)$$

اندیس‌ها برای نمایش دو ناحیه مجاور و IC کنتراست تصویر است. برای ساده شدن محاسبه کنتراست تصویر، سطح خاکستری را با قرار دادن $100 \log 1000$ به جای ۲۰۰۰ در رابطه ۴ به فرم زیر تبدیل می‌کنیم.

$$GV = 1000 \log 100K \quad (6)$$



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

قطعه استاندارد حساسیت کنتراست که شبیه سازی آن انجام شده است، با استفاده از سیستم CR موجود در آزمایشگاه NDT مرکز نظام ایمنی هسته‌ای کشور، با پارامترها و تنظیمات زیر به منظور بررسی تأثیر ولتاژ بر کنتراست، پرتونگاری شده است و تصاویر حاصل از پرتونگاری در ولتاژهای ۷۰، ۹۰، ۱۱۰ و ۱۳۰ کیلوولت در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

Sfd= ۱۰۰cm

IP: GP

Laser Power: Low

Laser Spot Size: ۵۰ micrometer

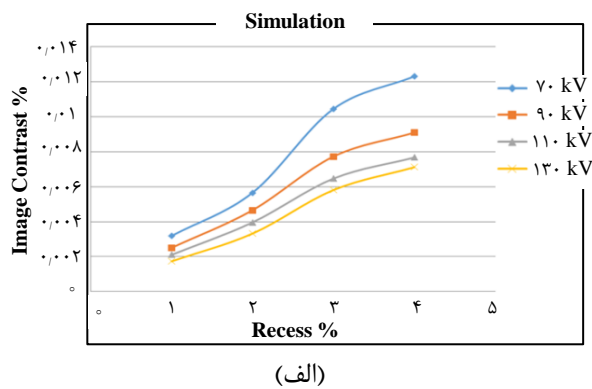
PMT Gain: ۳۰

در تصاویر شکل ۱۱ (نتایج آزمایشات عملی)، به صورت چشمی می‌توان 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 می‌شود. به بیان دیگر، در آزمایشات عملی برای هر نقطه از تصویر، سطح خاکستری تعیین می‌شود، این در حالی است که در شبیه سازی می‌توان شار یا دز را محاسبه کرد. ارتباط بین دز و اندازه خاکستری در یک سیستم CR می‌تواند از یک سیستم به سیستم دیگر متفاوت باشد و در واقع یکی از مشخصه‌های سیستم CR است که توسط طراح و سازنده تعیین می‌شود. این ارتباط در سیستم CR شرکت Care Stream به صورت یک رابطه لگاریتمی به شکل زیر داده شده است [۱۹]:

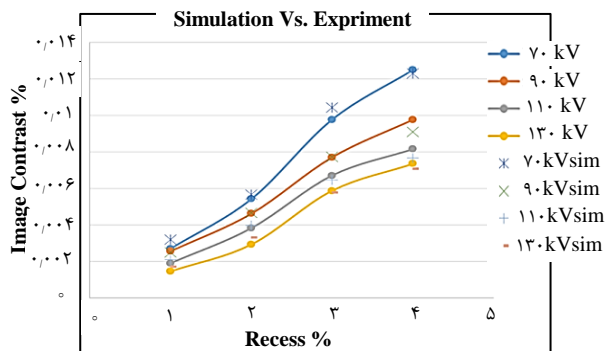
$$EI = 1000 \cdot \log K + 2000 \quad (4)$$

1. Image Contrast

2. Gray Value



(الف)



(ب)

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 مونت کارلوی فلوکا، برای مطالعه پرتونگاری و بررسی کنتراست تصویر انجام شده است. برای این منظور سیستم کامل پرتونگاری شامل دستگاه مولد پرتوهای X مدل ۲۳۵ CERAM، صفحات تصویرساز و قطعه استاندارد حساسیت کنتراست شبیه‌سازی شده‌اند. به منظور بررسی صحت شبیه‌سازی مولد پرتو، طیف حاصل از شبیه‌سازی 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 به منظور بررسی کنتراست تصویر، یک قطعه استاندارد حساسیت کنتراست از جنس آلومینیم شبیه‌سازی شده است. در صورتی که بخواهیم تصویر قطعه را به دست آورده و بررسی‌ها را بر روی آن انجام دهیم، به دلیل زمان‌بری بسیار زیاد شبیه‌سازی، لازم

با جای‌گذاری در رابطه ۵ کنتراست تصویر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$IC = \log 100K_p / \log 100K_1 - 1 \quad (7)$$

مقادیر کنتراست تصویر حاصل از شبیه‌سازی 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 متوسط‌گیری 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 ارائه شده با نتایج آزمایشات عملی است. بنابراین از روش شبیه‌سازی ارائه شده در این تحقیق می‌توان در پرتونگاری CR و ارزیابی کنتراست تصویر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کیفیت تصویر استفاده کرد. نتایج محاسبه کنتراست تصویر با استفاده از روش شبیه‌سازی ارائه شده و نتایج آزمایشات عملی انجام شده در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند.

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

	۱۳۰ kV		۱۱۰ kV		۹۰ kV		۷۰ kV		
	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	Sim	Exp	
ناحیه ۴٪	۰٫۷۱	۰٫۷۳	۰٫۷۷	۰٫۸۲	۰٫۹۱	۰٫۹۸	۱٫۲۳	۱٫۲۵	
ناحیه ۳٪	۰٫۵۸	۰٫۵۹	۰٫۶۵	۰٫۶۷	۰٫۷۷	۰٫۷۷	۱٫۰۴	۰٫۹۸	
ناحیه ۲٪	۰٫۳۳	۰٫۲۹	۰٫۴۰	۰٫۳۸	۰٫۴۷	۰٫۴۶	۰٫۵۷	۰٫۵۴	
ناحیه ۱٪	۰٫۱۷	۰٫۱۵	۰٫۲۱	۰٫۱۹	۰٫۲۵	۰٫۲۶	۰٫۳۲	۰٫۲۷	

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 X-ray 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).
18. 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 پروفایل انجام شده است که می‌تواند در تحلیل‌های مورد نیاز استفاده شود. با استفاده از روابطی که روش استخراج آن‌ها نشان داده شده است، می‌توان نتایج شبیه‌سازی (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٪ می‌رسد. البته بخشی از این اختلاف به کاهش دقت آزمایشات عملی در ناحیه ۱٪ برمی‌گردد. در دیگر نواحی اختلاف کم‌تر از ۱۰٪ و در مواردی نیز در حدود ۱٪ است.

تشکر و قدردانی

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).
2. 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).