

## شبیه ساز محاسبات پرتونگاری صنعتی برای چشمه های گاما

بهروز رکرک<sup>۱\*</sup>، احمد پیرجمالی<sup>۲</sup>، نورالدین محمدزاده<sup>۱</sup>، امیر موافقی<sup>۲</sup>

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

۲- سازمان انرژی اتمی ایران، مرکز نظام ایمنی هسته‌ای

۳- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

\*brokrok@aeoi.org.ir

### چکیده

پرتونگاری صنعتی یکی از پرکاربردترین آزمون‌ها در بین روش‌های غیرمخرب بازرسی قطعات و تجهیزات است. استفاده از ابزارهای کامپیوتری در انجام فعالیت‌های مستلزم انجام محاسبات، می‌تواند علاوه بر صرفه جویی در زمان انجام فعالیت‌ها، به کاهش خطای انسانی در انجام محاسبات و افزایش قابلیت اطمینان، دقت و صحت محاسبات انجام شده منجر گردد. انجام رادیوگرافی صنعتی مستلزم یک سری محاسبات و انتخاب صحیح پارامترها برای حصول کیفیت مطلوب در تصاویر پرتونگاشت است. این محاسبات عمدتاً شامل محاسبات مربوط به اکتیویته چشمه، انتخاب تکنیک پرتودهی، محاسبه فاصله چشمه تا فیلم، محاسبه زمان پرتودهی، محاسبات مربوط به شاخص کیفیت تصویر و محاسبه حساسیت است. هر کدام از این پارامترها به نوع چشمه مورد استفاده، نوع فیلم، دانسیته نوری مطلوب، هندسه، جنس و ابعاد قطعه و حساسیت مطلوب وابسته است. در حال حاضر نرم‌افزارهایی برای انجام محاسبات پرتونگاری موجود است که عمدتاً فقط بخش محدودی از محاسبات را انجام می‌دهند. محاسبات پرتونگاری با تهیه یک رابط گرافیکی برای شبیه‌سازی و انجام محاسبات نسبتاً کامل پرتونگاری صنعتی با چشمه‌های گاما و با در نظر گرفتن استانداردهای صنعتی مرتبط انجام شده است. نتایج حاصل از نرم افزار شبیه ساز تهیه شده با نتایج حاصل از دیگر برنامه‌های کاربردی موجود مقایسه و تایید شده‌اند.

### واژگان کلیدی:

شبیه ساز، پرتونگاری صنعتی، نرم افزار، چشمه گاما، فنون پرتونگاری

### ۱- مقدمه

شامل فیلم‌های کمپانی Agfa با شماره های D2، D4، D5 و D7 است. برای چشمه Ir-192 در نسخه تبلیغاتی این نرم افزار محاسبه ضخامت از 2 mm تا 16 mm و در نسخه کامل از 2 mm تا 100 mm انجام می‌شود. برای چشمه Se-75 در نسخه تبلیغاتی این نرم افزار محاسبه ضخامت از 2 mm تا 10 mm و در نسخه کامل از 2 mm تا 30 mm انجام می‌شود. این نرم افزار با دریافت اکتیویته منبع، اندازه فاصله چشمه تا فیلم، نوع فیلم و دانسیته مطلوب، زمان پرتودهی را محاسبه می‌کند. همچنین در این نرم افزار این قابلیت وجود دارد که با تعیین زمان پرتودهی دانسیته حاصل محاسبه گردد. قابلیت های این نرم افزار صرفاً محدود به موارد فوق است و بخش وسیعی از نیاز کاربران را پوشش نمی‌دهد. نمونه دوم، Radiography Calculation (ATTAR)، محصول کمپانی Advanced Technology Testing And Research است. این نرم افزار محاسبات پرتونگاری صنعتی برای چشمه IR-192 را انجام می‌دهد. در این نرم

امروزه برای انجام محاسبات رادیوگرافی نرم افزارهایی موجود است که توسط مراکز و یا شرکت های خارجی تهیه شده اند و هر کدام برخی از محاسبات را انجام می دهند که فایل اجرایی آنها بعضاً به صورت تبلیغاتی و با محاسبات محدود در شبکه اینترنت موجود است و نرم افزار کامل قابل خریداری است.

سه نمونه خارجی تحت عناوین RT Calculator Isotope و Radiography Calculation (ATTAR) و RTcalc مورد بررسی قرار گرفته اند [۱-۳].

نمونه اول، RT Calculator Isotope، توسط کمپانی OK-S Software که یک کمپانی آلمانی است تهیه شده است و کاربرد آن برای پرتونگاری با چشمه Se-75 و Ir-192 است. نسخه موجود در شبکه اینترنت این نرم افزار نسخه کامل نیست و نسخه کامل آن نیاز به خریداری و پرداخت هزینه دارد. فیلم های مورد استفاده در نرم افزار

نمونه‌های ذکر شده در مقدمه محاسبات نسبتاً کاربردی، اما تا حدی ناقص و محدود در پرتونگاری صنعتی را انجام می‌دهند. منابع پرتو، محدوده ضخامت، جنس‌های مختلف مواد و نوع فیلم از جمله مواردی هستند که در نرم افزارهای فوق به شکل محدودی در نظر گرفته شده‌اند.

همچنین در نرم‌افزارهای فوق شکل هندسی قطعه در محاسبات در نظر گرفته نشده است. اصولاً در پرتونگاری صنعتی به صورت کاربردی و کلاسیک قطعات بیشتر به دو فرم صفحه‌ای (Plate) و لوله (Pipe) در نظر گرفته می‌شوند و اولین محاسبه‌ای که انجام می‌شود، محاسبات مربوط به انتخاب تکنیک پرتونگاری است. تکنیک‌های پرتونگاری بر اساس تعداد صفحاتی که پرتو از آنها عبور می‌کند و تعداد صفحاتی که از آنها تصویر ایجاد می‌شود نامگذاری می‌گردند. در مورد صفحات، فقط از تکنیک تک دیواره - تک تصویر (SWSI) استفاده می‌شود و در مورد لوله‌ها از تکنیک‌های تک دیواره - تک تصویر شامل شعاعی (Panoramic) و غیر شعاعی (Non-Panoramic)، دو دیواره - تک تصویر (DWSI) و دو دیواره - دو تصویر شامل تکنیک‌های بیضوی (Elliptic) و روی هم افتاده (Superimposed) استفاده می‌شود. در مورد لوله‌ها گام اول محاسبه، تعیین تکنیک پرتونگاری است. نمونه‌های معرفی شده در بخش قبل، صرفاً محاسبات مربوط به Plate را، آن هم نه به صورت کامل انجام می‌دهند و در صورتی که اپراتور بخواهد از آنها در محاسبات لوله‌ها استفاده کند، می‌بایست ابتدا بخشی از محاسبات را خود انجام دهد و سپس با این نرم‌افزارها بخش محدود دیگری از محاسبات را انجام دهد.

در نرم‌افزار ارائه شده، پارامترهای مورد نیاز به عنوان ورودی برنامه برای شبیه‌سازی و انجام محاسبات پرتونگاری شامل موارد زیر است:

- نوع قطعه (شامل: صفحه یا لوله)
- جنس قطعه (شامل: آهن (یا فولاد)، مس، آلومینیوم و روی به عنوان فلزاتی که در پرتونگاری موارد کاربرد وسیع‌تری دارند)
- ابعاد و ضخامت قطعه (شامل: طول جوش (در مورد صفحه)، قطر (در مورد لوله)، ضخامت پایه، و ضخامت‌های گرده و ریشه جوش)

افزار اکتیویته چشمه، ضخامت قطعه، نوع فیلم، دانسیته مطلوب و فاصله چشمه تا فیلم (Sfd) تو سطر اپراتور وارد می‌شوند و نرم‌افزار بر اساس این اطلاعات، زمان پرتودهی را محاسبه می‌کند. علاوه بر محاسبه زمان پرتودهی، نرم‌افزار به صورت جداگانه قابلیت محاسبه حداقل Sfd و همچنین محاسبه حساسیت پرتونگاری با استفاده از شماره سیم قابل رویت را دارد. نرم‌افزار فوق نیز اگرچه نسبت به نرم‌افزار اول قابلیت‌های بیشتری دارد، لیکن صرفاً برای چشمه ایریدیوم و جنس ماده فولادی و فقط برای فیلم‌های AA400، D4 و D7 تهیه شده و نوع تکنیک مناسب را نیز تعیین نمی‌کند. در این نرم‌افزار نقش طول قطعه نیز در محاسبه Sfd لحاظ نگردیده است و فقط Sfd با استفاده از Ug تعیین می‌شود که از نظر عملی، محاسبه‌ای ناقص محسوب شده و با توجه به طول قطعه نیاز به اصلاح دارد.

هدف از این تحقیق تهیه نرم‌افزاری بوده است که محاسبات را در محدوده وسیع و نسبتاً کاملی از کاربردهای پرتونگاری صنعتی انجام دهد. طراحی و پیاده‌سازی یک نرم‌افزار برای انجام محاسبات رادیوگرافی صنعتی با استفاده از پرتوهای گامای چشمه ایریدیوم ۱۹۲، کبالت ۶۰، سزیم ۱۳۷ و سلنیوم ۷۵ به عنوان کاربردی‌ترین منابع پرتونگاری گاما، برای ضخامت‌های مختلف صفحات و ضخامت‌ها و قطرهای مختلف لوله‌ها (در محدوده کاربردی) در این تحقیق انجام شده است. در انجام محاسبات و پیاده‌سازی نرم‌افزاری، استانداردهای ASME و ISO ملاک عمل بوده‌اند [۵ و ۴].

نمونه سوم، اپلیکیشن RTcalc for NDT که توسط تیم ژاپنی La Primavera برای اندروید طراحی شده و در مارکت گوگل قرار دارد، نسخه رایگان آن روی ضخامت یک اینچ ثابت بوده و قابلیت تعیین ضخامت را ندارد (این محدودیت در صورت خرید برداشته می‌شود). این اپلیکیشن دارای دو بخش گاما و X است و در بخش گاما سه نوع چشمه و سه نوع فیلم را پوشش می‌دهد و جنس قطعه نیز فقط آهن در نظر گرفته شده است و فقط قطعات صفحه‌ای را پوشش می‌دهد. این اپلیکیشن مزیت تحت اندروید بودن را داراست اما امکانات آن کافی نیست و مانند سایر نرم‌افزارها، جداول آن بسته است و قابلیت توسعه ندارد.

## ۲- پارامترها و محاسبات پرتونگاری

روش مناسب جهت پرتونگاری را نیز پیشنهاد می‌دهد. علاوه بر آهن، چند فلز پر کاربرد نظیر آلومینیوم و مس نیز در پایگاه داده موجودند و چنانچه جنس قطعه، در پایگاه داده موجود نباشد می‌توان آن را به پایگاه داده افزود. چشمه‌های موجود نیز در برنامه تعریف و ذخیره می‌شوند و برنامه همواره اکتیویته فعلی آنها را محاسبه می‌نماید. چند نوع فیلم مختلف از قبیل Kodak, Fuji, Agfa, Foma در پایگاه داده‌ای نرم افزار تعریف شده‌اند و چنانچه فیلم مورد استفاده در پایگاه داده نداشت، نظیر موارد قبلی قابل افزودن است.

محاسبات مربوط به حداقل فاصله چشمه تا فیلم (Sfd) بر اساس رابطه عدم وضوح هندسی ذکر شده در استانداردهای ASME و ASTM انجام می‌شود.

$$Sfd = Ofd(1 + F/Ug) \quad (1)$$

که در آن Ofd فاصله دورترین نقطه قطعه تا فیلم و Ug عدم وضوح هندسی است.

برای قطعات صفحه‌ای، علاوه بر عدم وضوح هندسی اثر طول قطعه نیز بر اساس مرجع [۶] مطابق روابط زیر لحاظ شده است. (۲)

$$\begin{cases} \frac{l}{T} \leq 1.1 & \text{برای رادیوگرافی معمولی} \\ \frac{l}{T} \leq 1.06 & \text{برای رادیوگرافی حساس} \end{cases}$$

که در آن l بلندترین طول عبور مورب پرتو در قطعه و T ضخامت قطعه است.

محاسبه اکتیویته چشمه بر اساس اکتیویته اولیه آن و پس از گذشت مدت زمان t بر اساس رابطه (۳) تعیین می‌شود.

$$A = A_0 \exp(-0.693t/\text{HalfLife}) \quad (3)$$

محاسبه زمان پرتودهی توسط نرم افزار با استفاده از فرمول (۴) انجام می‌شود:

$$\text{time} = \frac{Sfd^2 \cdot f(t) \cdot FF}{A \cdot RHM \cdot 10000} \quad (4)$$

که در آن Sfd فاصله چشمه تا فیلم بر حسب سانتیمتر است،

f(t) تابعی از ضخامت قطعه است و با استفاده از جدول ۱ تعیین می‌شود،

FF فیلم فاکتور مربوط به فیلم و از جدول ۲ استفاده شده است،

A اکتیویته چشمه بر حسب کوری و RHM فاکتور گامای چشمه است،

• نوع، اکتیویته و ابعاد چشمه پرتوزا (شامل: چشمه‌های ایریدیوم-۱۹۲، کبالت-۶۰، سزیموم ۱۳۷ و سلنیوم ۷۵ که پر کاربردترین چشمه‌های پرتونگاری صنعتی هستند)

• نوع فیلم و دانسیته مطلوب (شامل سری کامل فیلم‌های: آگفا، کداک، فوجی و فوما)

• عدم وضوح هندسی مطلوب

• حساسیت مطلوب

پارامترهایی که توسط نرم‌افزار محاسبه و نمایش داده می‌شوند (خروجی‌ها) نیز شامل موارد زیر است:

• محاسبه و تعیین نوع تکنیک در مورد لوله‌ها

• محاسبه حداقل Sfd

• محاسبه اکتیویته روز برای چشمه مورد نظر

• محاسبه زمان پرتودهی

• محاسبه شاخص کیفیت تصویر

• محاسبه حساسیت به دست آمده واقعی

### ۳- نتایج و بحث

۱-۳ معرفی نرم افزار تهیه شده

نرم‌افزار طراحی شده هیچ یک از محدودیت‌های نرم‌افزارهای مشابه را ندارد و دارای یک پایگاه داده با قابلیت تعریف داده‌هاست که اطلاعات مربوط به فیلم‌ها، چشمه‌ها، جنس قطعات و غیره را ذخیره نموده و در محاسبات از این اطلاعات استفاده می‌نماید. اطلاعات جداول این پایگاه داده قابل ویرایش و افزایش است بنابراین نرم‌افزار عملاً هیچ گونه محدودیتی در استفاده از انواع فیلم‌ها، چشمه‌ها و جنس قطعه‌ها ندارد. جداول زیر در پایگاه داده طراحی شده‌اند.

• جدول چشمه‌ها: شناسه چشمه، نام چشمه، نیمه عمر،

RHM و HVL

• جدول فیلم‌ها: شرکت سازنده، مدل فیلم، FFR و FF

• جدول مواد: نوع ماده، شناسه چشمه، و فاکتور ماده (MF)

• جدول IQI: شماره سیم و قطر آن در هر نوع استاندارد

محاسبات این نرم‌افزار، قطعات صفحه‌ای و همچنین قطعات لوله‌ای را پوشش می‌دهد و برای قطعات لوله‌ای،

روابط دیگری برای محاسبه زمان نیز وجود دارد مانند رابطه معروف به کوری-ساعت (C/H) که نرم افزار قابلیت افزودن محاسبه بر اساس این روابط را نیز دارد. نرم افزار از حساسیت مطلوب مورد نظر برای تعیین شماره سیم شاخص کیفیت تصویر نوع سیمی بر مبنای استانداردهای ISO, ASME, BS استفاده می کند. حساسیت پرتونگاری طبق رابطه زیر تعریف می شود:

$$S = \frac{\text{ضخامت کوچکترین سیم قابل رویت}}{\text{ضخامت قطعه}} \times 100 \quad (5)$$

حساسیت پرتونگاری برای کاربردهای معمولی حدود ۲٪ و برای کاربردهای حساس حدود ۱٪ در نظر گرفته می شود و با قرار دادن این مقادیر و ضخامت قطعه در رابطه فوق، ضخامت کوچکترین سیمی که باید رویت شود، تعیین می شود [۷]. از سوی دیگر پس از عملیات پرتونگاری و تعیین عملی نازکترین سیم قابل رویت، با استفاده از رابطه فوق، حساسیت عملی به دست آمده محاسبه می شود.

جدول (۱) مقادیر تابع  $f(t)$  مورد استفاده در محاسبه زمان

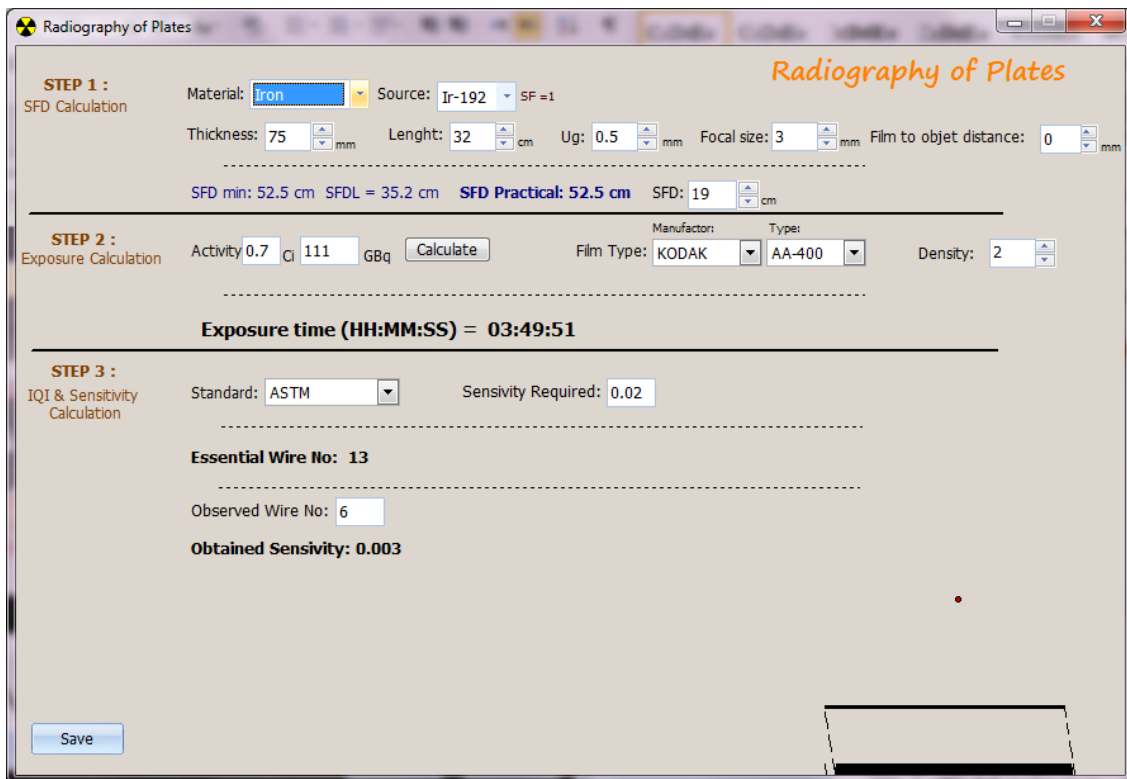
پرتودهی				
t(mm) f(t)	t(mm) f(t)	t(mm) f(t)	t(mm) f(t)	t(mm) f(t)
5	19	33	47	61
5.3	10.0	18.9	35.7	67.4
6	20	34	48	62
5.5	10.4	19.7	37.3	70.6
7	21	35	49	63
5.8	10.9	20.7	39.1	73.8
8	22	36	50	64
6.0	11.4	21.6	40.9	77.3
9	23	37	51	65
6.3	12.0	22.6	42.8	80.9
10	24	38	52	66
6.6	12.5	23.7	44.8	84.6
11	25	39	53	67
6.9	13.1	24.8	46.9	88.6
12	26	40	54	68
7.3	13.7	25.9	49.0	92.7
13	27	41	55	69
7.6	14.4	27.1	51.3	97.0
14	28	42	56	70
7.9	15.0	28.4	53.7	101.5
15	29	43	57	71
8.3	15.7	29.7	56.2	106.3
16	30	44	58	72
8.7	16.5	31.1	58.8	111.2
17	31	45	59	73
9.1	17.2	32.6	61.6	116.4
18	32	46	60	74
9.5	18.0	34.1	64.4	121.8

جدول (۲) فیلم فاکتور برای فیلم های مختلف

Film Brand	DUPONT	FUJI	FOMA	KODAK	AGFA
Film Type	NDT-45 NDT-55 NDT-65 NDT-70 NDT-75	IX-50 IX-80 IX-100 IX-150	R2 R4 R5 R7 R8	DR SR-45 M-100 MX-125 M B T-200 AA-400 AX CX	D2 D3 D4 D5 D7 D8
FFR	6.9 3.8 1.7 1.1 0.8	4.6 2.5 1.1 0.8	9.6 4.6 1.9 1.3 0.8	11.7 9.2 7.6 4.4 3.9 2.9 2.2 1.3 1.1 0.8	9.6 7.7 4.6 1.9 1.3 1.3 1.1
FF	180 100 45 28 22	120 65 30 20	250 120 50 35 22	306 240 200 115 102 75 57 34 30 20	250 200 120 50 35 35 30 34 30 20

۲-۳ کاربری و رابط گرافیکی نرم افزار پنجره نرم افزار به محض باز شدن منتظر دریافت اطلاعات ورودی است تا محاسبات را طی گام های سه گانه زیر انجام دهد. تصویری از رابط گرافیکی نرم افزار در شکل (۱) نمایش داده شده است.

۲-۳ کاربری و رابط گرافیکی نرم افزار پنجره نرم افزار به محض باز شدن منتظر دریافت اطلاعات ورودی است تا محاسبات را طی گام های سه گانه زیر انجام



شکل (۱) نمایشی از رابط گرافیکی نرم افزار شبیه ساز محاسبات پرتونگاری - قطعه صفحه ای

با توجه به اینکه نرم افزار آخرین اطلاعات استفاده شده را نگاه می دارد، نتایج هرگونه تغییر در مفروضات رادیوگرافی قطعه به محض اعمال آن تغییر در خروجی محاسبات به نمایش گذاشته می شود.

در مورد لوله ها، همان گام های ذکر شده در مورد صفحات طی می شود با این تفاوت که قطر خارجی و همچنین گرده جوش (Re) و ریشه جوش (Ro) به تفکیک نیز در نظر گرفته می شوند و با توجه به مشخصات داده شده، روش پرتونگاری نیز توسط نرم افزار پیشنهاد می شود و اگر به داخل لوله دسترسی نداشته باشیم، با تعیین این وضعیت در نرم افزار، روش مناسب بعدی پیشنهاد می شود. نمایشی از رابط گرافیکی نرم افزار شبیه ساز محاسبات پرتونگاری در مورد محاسبات مربوط به قطعات لوله ای در شکل (۲) نمایش داده شده است.

گام های اجرایی برای کاربری نرم افزار به شرح زیر است:

#### گام اول: محاسبه SFD

با تعیین جنس قطعه، نوع چشمه، ضخامت و طول قطعه، عدم وضوح هندسی، اندازه موثر چشمه و فاصله فیلم تا زیر قطعه، مقدار Sfd حداقل براساس عدم وضوح هندسی، مقدار Sfd براساس طول قطعه و همچنین Sfd عملی محاسبه شده و نمایش داده می شود. در مورد لوله ها قطر خارجی نیز دریافت می شود.

#### گام دوم: محاسبه زمان پرتو دهی

با تعیین اکتیویته، نوع فیلم و دانسیته، زمان پرتو دهی محاسبه و نمایش داده می شود.

**گام سوم:** هم در همین پنجره وجود دارد که مربوط به تعیین حساسیت و وایر مشاهده شده است که در صورت نیاز می توان از آن نیز استفاده کرد. در این گام، استاندارد و حساسیت مورد نظر مشخص می شود.

شکل (۲) نمایی از رابط گرافیکی نرم افزار شبیه ساز محاسبات پرتونگاری - قطعه لوله‌ای

به عنوان مثال هر کدام از آنها دارای کاستی‌هایی در انتخاب انواع چشمه، انواع جنس قطعات، انواع فیلم و همچنین استاندارد مورد استفاده هستند و نرم‌افزار تهیه شده می‌تواند با رفع این کاستی‌ها به عنوان یک نرم‌افزار جامع برای پرتونگاری گاما مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۵- منابع

- [1] RT Calculator Isotope, [http://www.ok-s.com/software\\_en/ndtrt/ndtrt.php](http://www.ok-s.com/software_en/ndtrt/ndtrt.php), Accessed 10.08.16
- [2] Radiography Calculation (ATTAR), [www.attar.com.au/uploadimage/Product/ProductImage/radiography\\_calculations.xls](http://www.attar.com.au/uploadimage/Product/ProductImage/radiography_calculations.xls), Accessed 15.12.16
- [3] RTcalc, <https://play.google.com/store/apps/details?id=jp.ne.asahinet.mr2yknst.rtc&hl=en>, Accessed 12.01.17
- [4] ISO 5579, (2013). Non-destructive testing - Radiographic testing of metallic materials using film and X- or gamma rays - Basic rules.
- [5] ASME, Sec IV, Article 2, (2013). Radiographic Testing.
- [6] IAEA Training course series No. 3, (1992). Industrial Radiography.
- [7] ASNT Nondestructive Testing Handbook, Third Edition: Volume 4, (2002) Radiographic Testing (RT)

#### ۴- نتیجه‌گیری

شبیه ساز محاسبات پرتونگاری صنعتی با فیلم، با تهیه نرم‌افزاری با وسعت عملی گسترده و کاربردی از نظر قابلیت انتخاب نوع چشمه، جنس و ضخامت قطعه، نوع فیلم و استاندارد شاخص کیفیت برای دو نوع قطعه صفحه‌ای و لوله‌ای طراحی و پیاده سازی شده است. توالی گام‌ها در ورود داده‌ها، انجام محاسبات و نمایش خروجی‌ها به گونه‌ای منطقی و متناسب با نیاز کاربران پرتونگاری صنعتی پیاده سازی شده است و به شکلی پویا نتایج به هر دو صورت عددی و گرافیکی در معرض دید کاربر قرار می‌گیرند. با توجه به ویژگی‌های خاص نرم‌افزار از قبیل باز بودن جداول مربوط به چشمه‌ها، مواد و فیلم‌ها، و همچنین انجام محاسبات مربوط به لوله‌ها، که در هیچ یک از نرم‌افزارهای مشابه وجود ندارند، همچنین توانایی محاسبه سریع و پیش‌گیری از خطاهای محاسباتی در پرتونگاری، استفاده از این نرم‌افزار به پرتونگاران توصیه می‌گردد. صحت نتایج محاسبات نرم‌افزار تهیه شده از طریق مقایسه نتایج با نرم‌افزارهای موجود مورد ارزیابی قرار گرفته و تایید شده است. البته اکثر نرم‌افزارهای موجود قابلیت‌های کافی برای اعتبار سنجی نرم‌افزارهای تهیه شده را ندارند