طراحی مفهومی و امکان سنجی ساخت سیستم رادیوگرافی نوترونی واداشته با شتابدهنده الکترون

معانی ، پریسا* [۱]– رضازاده، مرضیه[۲] – فقهی، امیرحسین[۲] – علامت ساز، محمدحسن[۱]

[۱] دانشگاه صنعتی اصفهان ، دانشکده فیزیک ، گروه فیزیک هسته ای

[۲] دانشگاه شهید بهشتی ، دانشکده مهندسی هسته ای

چکیده:

در این مقاله امکان سنجی ساخت سیستم رادیوگرافی نوترونی با استفاده از چشمه فوتونوترونی بر پایه شتابدهنده الکترون 10MeV رودترون یزد بررسی شده است. بدین منظور با استفاده از کد MCNP هدف های الکتروفوتونی و فوتونوترونی بهینه انتخاب و سپس با قرار دادن کولیماتور رآکتور ۴۰ مگا واتی اراک در مقابل هدف فوتونوترونی بهینه شده، پارامترهای رادیوگرافی نوترونی اعم از شار نوترون حرارتی، TNC ونسبت n/γ محاسبه شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که پارامترهای اندازه گیری شده تطابق خوبی با پارامترهای بدست آمده در رآکتور و استانداردهای جهانی دارد و چشمه فوتونوترونی طراحی شده می تواند جایگزین مناسبی برای رآکتور ۴۰ مگا واتی اراک باشد.

کلمات کلیدی: *رادیوگرافی نوترونی ، چشمه فوتونوترونی، شار نوترون حرارتی، TNC، نسبت n/γ ، رآکتور ۴۰ مگا واتی اراک، رودترون یزد*

The conceptual design and feasibility study of constructing an Electron Accelerator-driven Neutron Radiography System

Maani, Parisa[1]; Rezazadeh, Marzieh[2]; Feghhi, Amirhossein[2]; Alamatsaz, Mohammadhassan[1]

[1] Affiliation: Isfahan University of Technology, Physics faculty

[2] Affiliation: Shahid Beheshti University, nuclear engineering faculty

Abstract:

In this work, the feasibility of constructing a neutron radiography system using photoneutron source based on a 10 MeV electron accelerator, Yazd Rhodotron, has been carried out. Optimization of photon convertor and photoneutron target utilizing MCNP code has been investigated, then by placing the optimized photoneutron target in front of the collimator for the 40 MW Arak reactor, neutron radiography parameters such as Thermal neutron flux, TNC ,and n/γ ratio have been calculated. According to the results neutron radiography parameters are really in a good agreement with the results obtained from the designed reactor based neutron radiography and standard ranges of neutron radiography system and the designed photoneutron source can be a suitable substitute for 40 MW Arak reactor neutron source.

Keywords: Neutron radiography, Photoneutron source, Thermal neutron flux, TNC, n/γ ratio, 40 MW Arak reactor, Yazd Rhodotron

مقدمه:

آزمون رادیوگرافی[۱] یکی از روش های مهم آزمون های غیر مخرب[۲] است که برای شناسایی عیوب داخلی اعم از فلزی و غیر فلزی به کار می رود. با وجود تفاوت طبیعت عملکرد فوتون و نوترون اصول تصویربرداری با نوترون دارای تشابهات زیادی با تصویربرداری فوتونی می باشد. ضرایب جذب جرمی پرتو ایکس با افزایش عدد اتمی، به طور منظم افزایش می یابد درحالی که این ضرایب برای نوترون ها ناگهان تغییر می کند و با افزایش عدد اتمی ماده جاذب، اعداد به صورت تصادفی تغییر می کنند[۱]. بنابراین رادیوگرافی نوترونی می تواند قطعات محتوی عناصر سبک مثل پلیمر، پلاستیک، لاستیک و مواد شیمیایی را آشکار کند حتی اگر آنها توسط عناصر سنگین احاطه شده باشند[۲]. به طور کلی تصویربرداری نوترونی و تصویربرداری فوتونی مکمل یکدیگر می باشند[۱].

چشمه هایی که تاکنون برای رادیوگرافی نوترونی استفاده شده اند راکتور، پلاسمای کانونی ، چشمه نوترون تلاشی، شتاب دهنده دوترون و پروتون و رادیوایزوتوپ نوترونی می باشد. در تحقیقی در دانشگاه پکینگ[۳] چین در تجهیزات رادیوگرافی نوترونی از شتاب دهنده خطی دوترون با انرژی دوترون ۲ MeV استفاده شده است [۳]. در سیستم رادیوگرافی نوترونی موسسه کاوالا[۴] از سه ژنراتور DD, TT, DT استفاده شده است و باریکه های پرتو یون تا انرژی تقریبا keV ۱۲۰ شتاب داده شده و به هدف تانتالیومی برخورد داده می شوند [٤]. یکی از جدیدترین منابع نوترون که مورد توجه قرار گرفته، چشمه های فوتونوترون با استفاده از شتابدهنده الکترونی است. بطور مثال در تحقیقاتی در دانشگاه های منگلر[۵] و تیسونگها[۶] به ترتیب از باریکه الکترونی MeV ۱۲ و MeV ۱۵ برای تولید نوترون استفاده شده است[٦-٥].

در روش تصویربرداری نوترونی جسم در معرض باریکه موازی نوترونی قرار می گیرد و آشکار ساز در پشت جسم تمام نوترون های عبوری چه آنهایی که با جسم برهم کنش کرده و تضعیف شده و چه آنهایی که برهم کنش نکرده اند را ثبت می نماید [۷].

در این تحقیق امکان سنجی ساخت سیستم رادیوگرافی نوترون بر پایه شتاب دهنده MeV ۱۰ رودترون یزد به عنوان جایگزینی برای چشمه نوترونی رآکتور ٤٠ مگاواتی اراک می باشد. بدین منظور چشمه فوتونوترونی طراحی و

---

[۱] Radiography test

[۲] Non-destructive tests

[3] Peking

[4] Kavala

[5] Mangalore

[6] Tsinghua

پارامترهای رادیوگرافی، شار نوترون حرارتی، TNC و نسبت n/γ محاسبه و با پارامترهای سیستم رادیوگرافی راکتور اراک [۱۲] مقایسه و ارزیابی شده است.

روش کار:

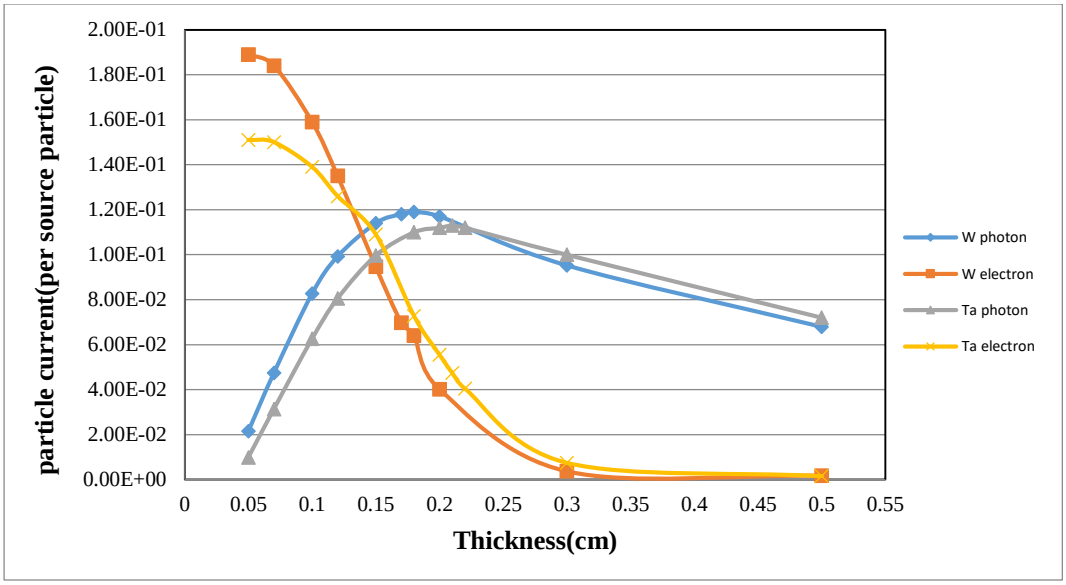
در این تحقیق از کد MCNPX جهت انجام محاسبات استفاده شده است. در این کد ترابرد ۳٤ ذره مختلف در هندسه سه بعدی، وابسته به مکان، انرژی، جهت و زمان به روش مونت کارلو انجام می گیرد. کتابخانه سطح مقطع کد برای نوترون و پروتون تا MeV ۱۵۰ موجود می باشد. واکنش های (n و γ) برای تولید فوتونوترون نیز در این کد شبیه سازی می شود. همچنین این کد قابلیت تعریف چشمه هایی از نوترون، فوتون، الکترون و پروتون را بصورت همزمان دارد[۸]. چشمه الکترونی در این پروژه شتابدهنده الکترونی رودترون TT200 با قطر دهانه بیم cm ۱ و جریان الکترونی mA ۱۰ و انرژی MeV ۱۰ می باشد. چشمه فوتونوترونی براساس روش هدف نازک طراحی شده است. برای هدف الکتروفوتونی از دو ماده تنگستن و تانتالیوم به علت عدد اتمی بالا استفاده شده است[۱]. این مواد با هندسه استوانه برش دار با ضخامت های cm ۰/۵-۰/۰ شبیه سازی شده است. به نظر می رسد که با قرار گرفتن چشمه الکترونی در داخل هدف مهار سازی الکترون بهتر صورت گیرد در نتیجه میزان تولید فوتون بیشتر خواهد شد. به این منظور برای تعیین قرارگیری موقعیت چشمه الکترونی، استوانه ای به شعاع cm ۰/۵ در درون هدف الکتروفوتونی برش داده شده است. چشمه الکترونی به صورت یک قرص به شعاع cm ۰/۵ و درموقعیت cm ۰/۰۲ از لبه سطح مقطع استوانه قرار گرفته است. پس از تعیین ضخامت بهینه در این مرحله، ماکزیمم شار فوتون تولیدی برای هدف های استوانه ای در شعاع های *cm* ۳ – ۰/۵ مورد بررسی قرار گرفته است. برای انتخاب هدف فوتونوترونی بررسی دو شرط انرژی آستانه (n و γ) و سطح مقطع برهم کنش فوتونوترون ضروری است. اتم های سنگین نظیر تنگستن و تانتالیوم دارای انرژی آستانه(n و γ) در حدود MeV ٦-۸ و σ_{max} =٤۰۰ mbarn و برای اتم های سبک مثل هیدروژن و برلیوم انرژی آستانه (n و γ) در حدود MeV ۵/۵-۱/۲ و σ_{max}=۲/۵ mbarn می باشد[۹]. برای تولید نوترون استوانه ای حول چشمه الکتروفوتونی قرار داده و با توجه به موارد مذکور دو هدف سنگین(تانتالیوم و طلا) و دو هدف سبک(اکسید دوتریوم و برلیوم) در ضخامت های cm ۵-۰/۱۰ مورد ارزیابی قرار گرفته است و هدف فوتونوترونی بهینه با معیار بازده نوترونی ماکزیمم براساس جنس، ضخامت و شعاع آن بدست آورده شده است. به منظور مهار سازی نوترون های ایزوتروپ از cm ۱۲ سرب به عنوان بازتابنده در اطراف چشمه فوتونوترونی استفاده شده است [۱۰]. برای رسیدن به پارامترهای رادیوگرافی نوترون، شار نوترون حرارتی، TNC ونسبت n/γ ، لازم است شار نوترون های حرارتی تقریبا $n/cm^2.s$ ۱۰^۵ باشد [۲]. مطالعات انجام شده در مورد هدف های فوتونوترونی نشان می دهد که انرژی نوترون های تولیدی در محدوده نوترون های سریع می باشد[۲]. لذا طراحی کند کننده بهینه ضروری می باشد. به منظور

انتخاب کندکننده مناسب برای این سیستم، ۳ ماده پلی اتیلن، پلکسی گلاس و BeD_2 بررسی شده است[۱۱]. با توجه به اینکه دهانه کولیماتور استفاده شده که در ادامه تشریح می شود، به شعاع cm ۷ است[۱۲] ، هندسه مورد نظر برای کند کننده مخروطی به شعاع cm ۷ انتخاب شده با ضخامت های cm ۵-۲۰ در جلوی چشمه فوتونوترونی قرار داده شده است. در این حالت بهره فوتون و نوترون خروجی در سه بازه انرژی نوترون حرارتی ($E<۱eV$)، فوق حرارتی ($۱eV < E < ۱۰keV$) و سریع ($۱۰keV < E< ۱۰MeV$) محاسبه و ۵ حالت بهینه بر اساس کمترین فوتون و بیشترین نوترون حرارتی انتخاب شده است. چشمه فوتونوترونی با ۵ حالت کندکننده بهینه را جایگزین چشمه رآکتور قرارداده و پارامترهای رادیوگرافی نوترون در دهانه خروجی کولیماتور رآکتور محاسبه شده است. در این کولیماتور کندکننده های نوترونی آهن و فلوئنتال در قسمت همگرا و پلی اتیلن در قسمت واگرا و B_4C به عنوان آستر داخلی و بیسموت به عنوان بازتابنده استفاده شده است [۱۲]. نتایج شبیه سازی MCNPX بگونه ای بدست آمده است که خطای آماری محاسبات زیر ۱۰٪ می باشد.

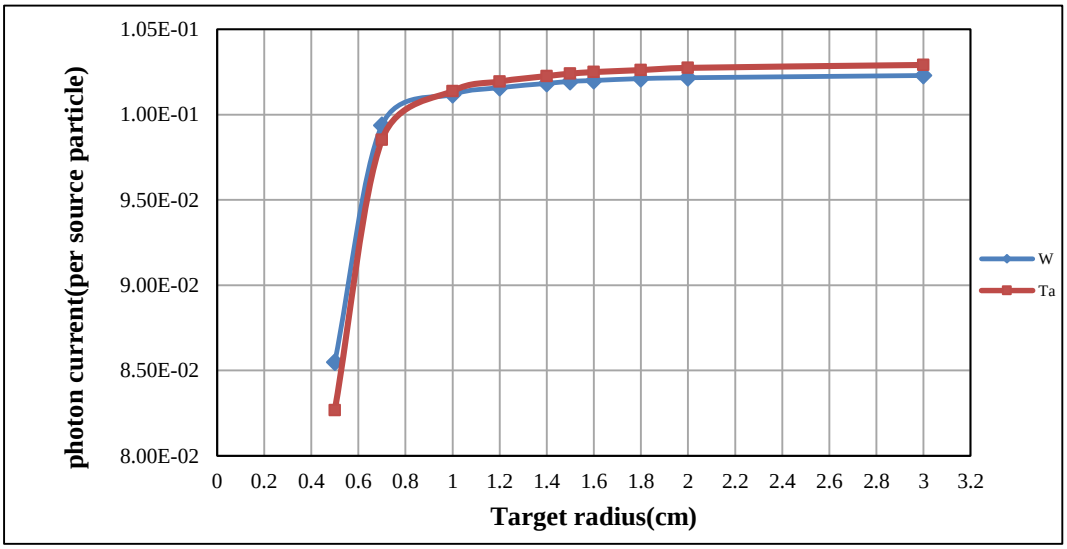
نتایج:

نتایج محاسبه شده در شکل (۱) جریان فوتون و الکترون خروجی به ازای یک ذره برای استوانه برش دار تنگستنی و تانتالیومی را نشان می دهد. با توجه به نمودار ضخامت بهینه برای هدف تنگستنی و تانتالیومی بر اساس ماکزیمم شار فوتون خروجی به ترتیب برابر cm ۰/۱۸ و cm ۰/۲۱ می باشد. ضخامت های بدست آمده تطابق خوبی را با تئوری برگر نشان می دهد [۱۳]. جریان فوتون خروجی برای هر دو هدف بهینه تنگستنی و تانتالیومی با ضخامت های cm ۰/۱۸ و cm ۰/۲۱ در شعاع های *cm* ۵-۰/۳ بررسی شده است. با توجه به شکل(۲) ، جریان فوتون تا شعاع *cm* ۱/۲ افزایش و پس از این شعاع افزایش قابل توجهی مشاهده نمی گردد بنابراین شعاع بهینه هدف تنگستنی و تانتالیومی *cm* ۱/۲ انتخاب شده است.

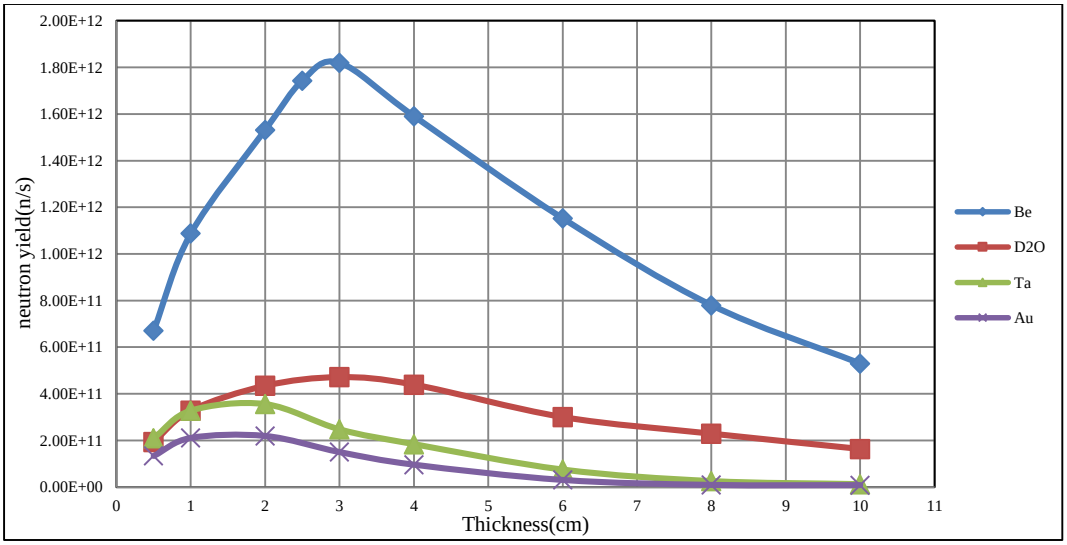
برای انتخاب جنس هدف فوتونوترونی، با توجه به شکل (۳) می توان دریافت که مواد سبک(برلیوم و اکسید دوتریم) نسبت به مواد سنگین(تانتالیوم و طلا) نوترون خروجی بیشتری دارند و نوترون خروجی در برلیوم تقریبا یک مرتبه بالاتر است و نوترون خروجی در ضخامت ۳cm از بقیه بالاتر است. برای هدف برلیومی ذکر شده تغیرات شعاع در بازه cm ۲-۳۰ بررسی و نتایج آن در شکل (٤) نشان داده شده است. شار نوترون خروجی با افزایش شعاع افزایش و در شعاع cm ۱۵ تقریبا به اشباع رسیده است. بنابراین شعاع بهینه برای هدف برلیومی cm ۱۵ خواهد بود. پیکربندی چشمه فوتونوترونی طراحی شده در شکل (۵) نمایش داده شده است.



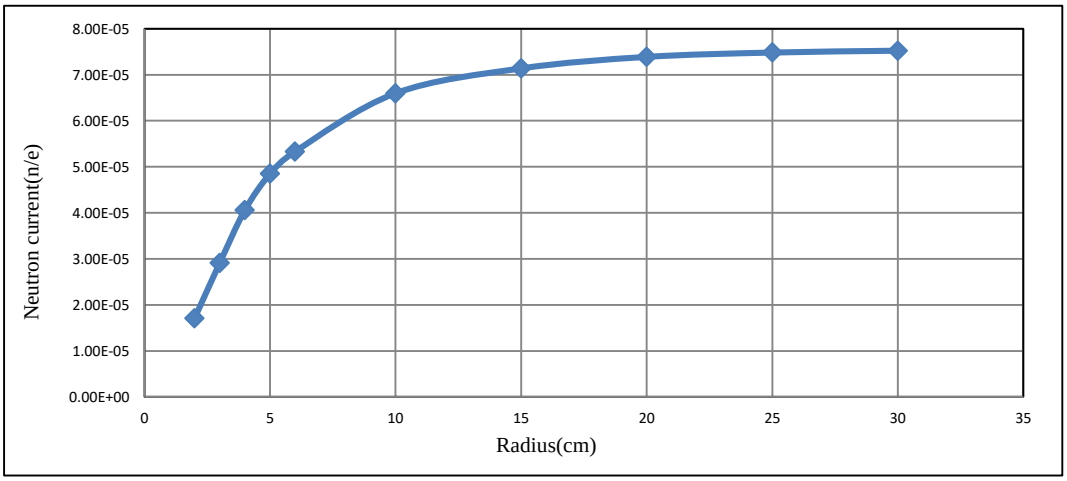
شکل۱- جریان فوتون و الکترون خروجی به ازای یک ذره برای استوانه برش دار تنگستنی و تانتالیومی بر حسب ضخامت



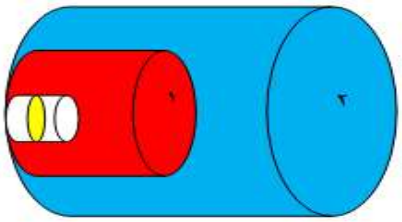
شکل۲- جریان فوتون به ازای یک فوتون بر حسب شعاع برای استوانه بهینه تنگستن به ضخامت cm ۰/۱۸ و تانتالیوم cm ۰/۲۱



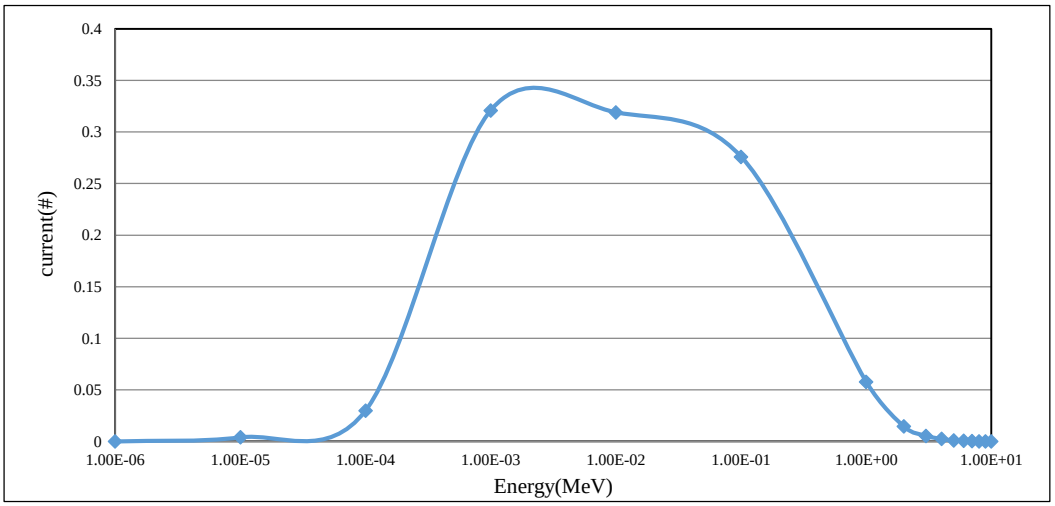
شکل۳- بهره نوترون خروجی بر حسب ضخامت برای هدف های فوتونوترونی برلیوم،دوتریم، طلاو تانتالیوم



شکل ٤- جریان نوترون به ازای یک ذره بر حسب شعاع هدف فوتونوترون



شکل ۵- پیکربندی چشمه فوتونوترونی طراحی شده ۱) هدف الکتروفوتونی۲) هدف فوتونوترونی

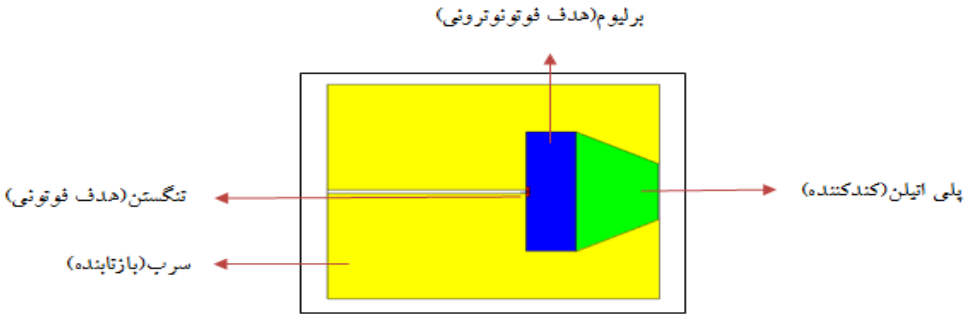


شکل ٦- طیف نوترون خروجی هدف فوتونوترون

پس از قرار دادن ۱۲ cm بازتابنده حول هدف فوتونوترونی ، طیف نوترون های خروجی مطابق شکل (٦) نشان می دهد که سهم نوترون های سریع و فوق حرارتی در طیف خروجی بالاست و از آنجاییکه نوترون حرارتی از پارامترهای مهم رادیوگرافی نوترونی محسوب می شود و نوترون سریع و فوق حرارتی از آلودگی های بیم محسوب می شود بنابراین استفاده از کند کننده مناسب ضروری است. به این منظور، کندکننده به شکل مخروط در مقابل هدف فوتونوترون مطابق پیکربندی شکل (۷) قرار گرفته است و نتایج به دست آمده در جدول(۱) نمایش داده شده است. مطابق جدول (۱) نتایج نشان می دهد که پلکسی گلاس ۱۵ و cm ۲۰ و پلی اتیلن۱۰، ۱۵ و cm ۲۰ نسبت نوترون های حرارتی به کل نوترون ها(Th/total) بالاترین مقدار است و بهره فوتون خروجی آنها نسبت به سایر حالت ها کمترین مقدار را دارد.

جدول ۱- بهره فوتون و نوترون خروجی در مواد مختلف کندکننده

کندکننده	(ضخامت cm)	Photon (p/e)	neutron(n/e)	Thermal n (n/e)	Th/total
پلکسی گلاس	۵	1.59E-01	1.25E-05	1.55E-06	1.24E-01
پلکسی گلاس	۱۰	1.01E-01	8.47E-06	3.05E-06	3.60E-01
پلکسی گلاس	۱۵	6.11E-02	5.61E-06	3.01E-06	5.37E-01
پلکسی گلاس	۲۰	3.64E-02	3.68E-06	2.44E-06	6.63E-01
پلی اتیلن	۵	1.65E-01	1.26E-05	2.51E-06	1.99E-01
پلی اتیلن	۱۰	1.08E-01	8.60E-06	4.25E-06	4.94E-01
پلی اتیلن	۱۵	6.73E-02	5.65E-06	3.87E-06	6.85E-01
پلی اتیلن	۲۰	4.17E-02	3.80E-06	2.94E-06	7.74E-01
BeD_2	۵	1.75E-01	3.89E-05	1.26E-06	3.24E-02
BeD_2	۱۰	1.20E-01	3.76E-05	4.36E-06	1.16E-01
BeD_2	۱۵	7.87E-02	3.00E-05	6.03E-06	2.01E-01
BeD_2	۲۰	5.16E-02	2.26E-05	6.21E-06	2.75E-01



شکل ۷- پیکربندی چشمه، بازتابنده و کند کننده

جدول ۲- پارامترهای رادیوگرافی برای مواد کندکننده مختلف				
کندکننده	**ضخامت(cm)**	**شار نوترون حرارتی($n/cm^2.s$)**	**n/γ($n/cm^2.mR$)**	**TNC**
پلی اتیلن	۱۰	9.44E+04	2.57E+07	4.75E-01
پلی اتیلن	۱۵	9.46E+04	1.99E+07	7.24E-01
پلی اتیلن	۲۰	7.36E+04	1.52E+07	8.54E-01
پلکسی گلاس	۱۵	7.66E+04	2.25E+07	5.64E-01
پلکسی گلاس	۲۰	6.23E+04	1.73E+07	7.22E-01

باتوجه به نتایج جدول (۱) و با توجه به اینکه پارامتر رادیوگرافی نوترونی TNC(نسبت شار نوترون حرارتی به کل نوترون ها) باید حدود٪۹۹- ۷۰ باشد ، موادی که میزان نوترون حرارتی به نوترون کل آنها بیشتر از ٪۴۰ بوده و همچنین میزان نوترون حرارتی بالا و فوتون کمتری داشته اند، به عنوان گزینه های مناسب کندکننده انتخاب شده اند. براساس این معیار، کندکننده پلی اتیلنی با ضخامت های ۱۰،۱۵ و cm ۲۰ و پلکسی گلاس با ضخامت های ۱۵ و cm ۲۰ به عنوان کندکننده بهینه معرفی شده اند. چشمه فوتونوترونی به همراه کندکننده های بهینه شده می تواند چشمه مناسبی برای جایگزینی چشمه نوترونی رآکتور ۴۰ مگاوات قرارگیرد. برای مقایسه این دو چشمه لازم است کولیماتور طراحی شده رآکتور را جلوی چشمه فوتونوترونی قرار داده و پارامترهای رادیوگرافی نوترونی را برای آن محاسبه کرد. مطابق جدول ۲ در ۱۵ سانتی متر پلی اتیلن ، شار نوترون حرارتی $n/cm^2.s$ ۹/۴۶×۱۰^۴ ، نسبتn/γ (برحسب$n/ cm^2.mR$) برابر با ۱/۹۹×۱۰^۷ و مقدار TNC ٪۷۲/۴ بدست آمده است، بنابراین می توان گفت ۱۵ سانتی متر پلی اتیلن با پارامترهای رادیوگرافی بیان شده تطابق خوبی را نشان می دهد.

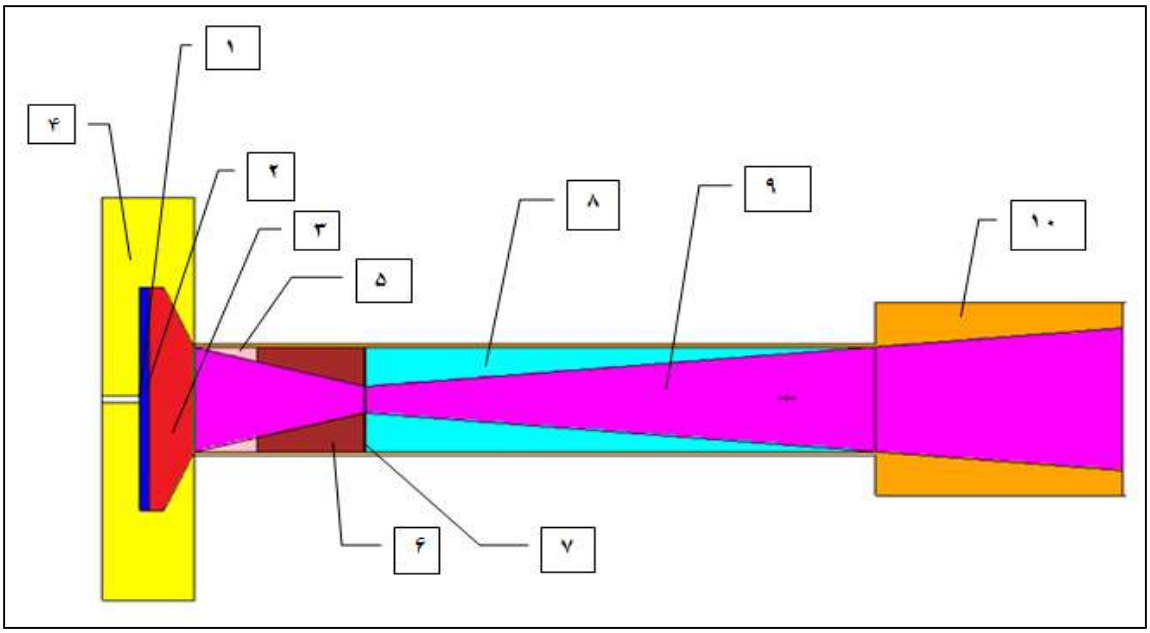
بنابراین مناسب ترین کند کننده برای این سیستم ۱۵ سانتی متر پلی اتیلن می باشد. پیکربندی سیستم رادیوگرافی طراحی شده در شکل (۸) و مواد استفاده شده در این سیستم در جدول(۴) نشان داده شده است.

به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی بدست آمده، مقایسه داده های تجربی رآکتور ۴۰ مگاواتی [۱۲] و نتایج متداول در شتابدهنده ها [۱۴] با نتایج این طراحی در جدول (۳) آورده شده است. مطابق این جدول، پارامتر شار نوترون حرارتی به دست آمده در این طراحی ($n/cm^2.s$ ۹/۴۶×۱۰^۴) تقریبا برابر با شار نوترون حرارتی در رآکتور($n/cm^2.s$ ۸/۱۰×۱۰^۴)

و در مرتبه شتابدهنده ها می باشد. نسبت n/γ به دست آمده ($۱/۹۹\times۱۰^{۷}$ n/ cm^2.mR) نیز تقریبا برابر با نسبت n/γ به دست آمده در رآکتور در یک مرتبه می باشند و همچنین این مقدار در محدوده نتایج متداول در شتابدهنده ها (n/ cm^2.mR $n/\gamma>۱۰^{۶}$) نیز می باشد. پارامترTNC در چشمه فوتونوترونی (۷۲/٤٪) که ۰/٤ بیشتر از رآکتور و در محدوده نتایج شتابدهنده ها متداول می باشد.

جدول ۳- مقایسه نتایج به دست آمده

	شار نوترون حرارتی (n/cm^2.s)	n/γ(n/ cm^2.mR)	TNC(%)
نتایج این طراحی	$۹/۴۶\times۱۰^{۴}$	$۱/۹۹\times۱۰^{۷}$	۷۲/۴
نتایج رآکتور ۴۰ مگاواتی[۱۲]	$۸/۱۰\times۱۰^{۴}$	$۱/۰۵\times۱۰^{۷}$	۷۲
نتایج متداول در شتابدهنده ها [۱۴]	$۱۰^{۴}$-$۱۰^{۵}$	$۱۰^{۶}$ n/γ>	۷۰-۹۹



شکل ۸- پیکربندی چشمه، بازتابنده ، کند کننده و کولیماتور رآکتور ٤۰ مگاواتی

جدول ۴- مواد استفاده شده در سیستم رادیوگرافی طراحی شده

۱	تنگستن به عنوان هدف الکترونی	۶	فلوئنتال به عنوان فیلتر نوترون سریع
۲	برلیوم به عنوان هدف فوتونوترونی	۷	B_4C به عنوان جاذب نوترون حرارتی
۳	پلی اتیلن به عنوان کند کننده	۸	پلی اتیلن به عنوان کند کننده
٤	سرب به عنوان بازتابنده	۹	هوا
٥	آهن به عنوان کند کننده	۱۰	بیسموت به عنوان بازتابنده

بحث و نتیجه گیری:

در این مقاله امکان سنجی ساخت سیستم رادیوگرافی نوترونی با شتابدهنده الکترون بررسی شده است. بدین منظور یک چشمه فوتونوترونی طراحی شده است . با بررسی مواد و هندسه های مختلف، یک ذره برای استوانه برش دار تنگستن و تانتالیوم با معیار شار فوتون خروجی ماکزیمم با ضخامت به ترتیب برابر ۰/۱۸ cm و ۰/۲۱ cm انتخاب شده است. بررسی اثر شعاع در این هدف های بهینه نشان داده است جریان فوتون تولیدی تا شعاع ۱/۲ *cm* افزایش و بعد از آن تغییرات شعاع تاثیری در میزان فوتون نخواهد گذاشت . در ادامه مواد سبک(برلیوم و اکسید دوتریم) و از مواد سنگین(تانتالیوم و طلا) بعنوان هدف فوتونوترونی استفاده شده است . نوترون خروجی برلیوم در ضخامت ۳cm از بقیه حالات بالاتر می باشد که با توجه به طیف فوتون تولیدی که میزان فوتون های کم انرژی و انرژی آستانه پایین واکنش فوتونوترون بریلیوم باعث تولید نوترون ماکزیمم شده است . شار نوترون خروجی در شعاع ۱۵ cm تقریبا به اشباع رسیده است. بازتابنده و کندکننده مورد استفاده در این پروژه به ترتیب ۱۲ cm سرب و ۱۵ cm پلی اتیلن می باشد. پس از قرار دادن کولیماتور رآکتور پارامترهای رادیوگرافی نوترونی ، شار نوترون های حرارتی، TNC و نسبت n/γ برای آن محاسبه شده است. نتایج شبیه سازی های بدست آمده با توجه به جدول (۳) نشان می دهد که میزان شار نوترون حرارتی در این طراحی نسبت به رآکتور اراک تقریبا به میزان ۱۵٪ افزایش پیدا کرده است و همچنین با میزان شار نوترون متداول در شتابدهنده ها که $n/cm^2.s$ $۱۰^{۵}$-$۱۰^{٤}$ می باشد تطابق خوبی را نشان می دهد. میزان نسبت n/γ در این طراحی $n/cm^2.mR$ $۱/۹۹\times۱۰^{۷}$ بدست آمده که در مقایسه با n/γ طراحی رادیوگرافی رآکتور اراک(n/

$cm^2.mR$ ۵/۰۱×۱۰^۷) اگرچه از یک مرتبه می باشند ولی کاهش ٤٠٪ آن شرایط مطلوب تری را نسبت به سیستم راکتور اراک را نشان می دهد. پارامتر TNC محاسبه شده در این طرح ٧٢/٤٪ است که تقریبا معادل مقدار سیستم رادیوگرافی رآکتور اراک و همچنین در بازه مطلوب در تحقیقات متداول در شتابدهنده ها می باشد. بنابراین می توان گفت چشمه فوتونوترونی طراحی شده در این تحقیق می تواند جایگزین مناسبی برای سیستم های رادیوگرافی با چشمه نوترونی نوترونی رآکتور باشد.

مراجع:

[1] Berger,H., Neutron radiography: Methods, capabilities and applications, Elsevier publishing, New York, 1965.

[2] Nares, Ch. Neutron Radiography, Nondestructive Testing Methods and New Applications, Dr. Mohammad Omar (Ed.), 2012.

[3] Zou ,Y. et al. , " A neutron imaging facility based on an RFQ accelerator", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 651, pp.62-65, 2011.

[4] Fantidis, J.et al., "Fast and thermal neutron radiographies based on a compact neutron generator", Journal of Theoretical and Applied Physics,pp.1-8, 2012.

[5] Huang, L., Li, Q.F. , Lin, Y.Z. “Calculation of photoneutrons produced in the targets of electron linear accelerators for radiography and radiotherapy applications “Nuc. Ins. and Meth. B 229 pp.339–347, 2005.

[6] IAEA-TECDOC-1604, Neutron Imaging: A Non-Destructive Tool for Materials Testing, Report of a coordinated research project, 2008.

[7] Shaikh, A.M., "Neutron Radiography Facility at CIRUS Reactor for NDE Applications", Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation, pp.148-151, 2009.

[8] “MCNPX User's Manual, Version 2.4.0,” LA-CP-02-408 (September 2002)

[9] Handbook on Photoneutron data for application Cross section and spectra, IAEA-TECDOC-Draft No3, March, 2000.

[10] Giusti, V., “Neutron sources for BNCT: a general review”, Department of Mechanical, Nuclear and Production Engineering, University of Pisa, Italy.
4. Gerard Bengua, Tooru Kobayashi, Kenichi Tanaka and Yoshinobu Nakagawa , “Evaluation of the characteristics of boron-dose enhancer (BDE) materials for BNCT using near threshold $^{7}Li(p,n)^{7}Be$ direct neutrons , Phys. Med. Biol. 49 (2004) 819–831.

[11] Gerard Bengua, Tooru Kobayashi, Kenichi Tanaka and Yoshinobu Nakagawa , “Evaluation of the characteristics of boron-dose enhancer (BDE) materials for BNCT using near threshold $^{7}Li(p,n)^{7}Be$ direct neutrons , Phys. Med. Biol. 49 (2004) 819–831.

[12] Rezazadeh, M. et al. , "Optimization study of some neutron imaging parameters in a reactor based neutron radiography facility", Progress in Nuclear Energy 87,pp.20-25,2016

[13] Berger, J. Seltzer, M., "Bremsstrahlung and Photoneutrons from Thick Tungsten and Tantalum Targets", Physical review, Vol.2, No.2, pp. 621-631,1970.

[14] Commission of the European Communities. *Neutron Radiography Handbook*. Edited by P von der Hardt and Röttger, H., Reidel, D., Publishing Company, Dordrecht, 1981.