



طراحی سلول شمارگر فعال سازی برای شمارش نوترون‌های تند حاصل از دستگاه پلاسمای کانونی

سحر رجبی مقدم، فریدون عباسی دوانی*

گروه کاربرد پرتوها، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران-ایران

چکیده: در این تحقیق دو هندسه‌ی مختلف برای شمارگرهای نوترون تپی، ارایه شده و سوسوزن پلاستیکی همراه با برگه‌های نقره برای افزایش بازدهی شمارش نوترون‌های تپی مورد استفاده قرار گرفته است. دو هندسه‌ی مکعب مستطیلی و استوانه‌ای با استفاده از کد MCNP4C برای سلول شمارگر شبیه‌سازی شده است. با توجه به آهنگ واکنش جذب در نقره، تعداد برگه‌های نقره و طول شمارگر بهینه شده است. طول بهینه برای سلول آشکارساز ۱۴ سانتی‌متر می‌باشد و با در نظر گرفتن هزینه‌ی ساخت، تعداد بهینه‌ی برگه‌های نقره برای هندسه‌ی مکعب مستطیلی و استوانه‌ای به ترتیب ۲۰ و ۱۰ برگه پیشنهاد شده است. با استفاده از داده‌های بهینه‌ی به دست آمده، آشکارسازی با هندسه‌ی مکعب مستطیلی ساخته شد. این آشکارساز برای اندازه‌گیری شار نوترون دستگاه پلاسمای کانونی SBUPF1 مورد استفاده قرار گرفت. نتایج این اندازه‌گیری‌ها نشان دادند که 3.71×10^7 نوترون در هر تپ تولید می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سوسوزن پلاستیکی، برگه‌های نقره، فعال‌سازی، طراحی سلول شمارگر فعال‌سازی

Design of Activation Counter Cell for Counting of Fast Neutrons Produced by Plasma Focus Device

S. Rajabi Moghadam, F. Abbasi Davani*

Radiation Application Department, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 1983963113, Tehran - Iran

Abstract: In this paper two geometries for pulsed neutron counter structure have been introduced and to increase the activation counter efficiency, plastic scintillation along with silver foils was used. Cubic and cylindrical geometries for activation counter cell were modeled using MCNP4C code. In respect of absorption reaction rate in silver, the number of silver foils and the length of the counter were optimized. The optimum length of 14 centimeters had been proposed for counter cell and because of the economic aspects, the optimum number of silver foils for cubic and cylindrical geometries are 20 and 10, respectively. The optimum data were used to construct a cubic counter and the neutron yield of SBUPF1 plasma focus device was measured by this counter. Experimental results show that about 3.71×10^7 neutrons are produced per pulse.

Keywords: Plastic Scintillation, Silver Foils, Activation, Design of Activation Counter Cell

*email: fabbasi@sbu.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۸۷/۱۱/۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۸۸/۳/۱۶

۱- مقدمه

شمارش نوترون‌های تپی به سبب زمان کوتاه تولید، همواره مورد توجه بوده است. در این زمینه شمارگرها و آشکارسازهای زیادی طراحی شده‌اند [۱ تا ۸]. برخی از مواد فعال‌شونده‌ای که برای افزایش بازده آشکارسازی در ساخت شمارگرها به کار می‌روند، سطح مقطع جذب بالایی برای نوترون‌های گرمایی دارند و بعضی نیز با نوترون‌های تند واکنش می‌کنند. در حالتی که مواد، سطح مقطع مناسبی برای واکنش با نوترون‌های تند نداشته باشند، باید از مواد کندکننده‌ای چون پارافین یا پلی‌اتیلن استفاده شود تا باعث کندشدن نوترون‌ها و واکنش آن‌ها با مواد فعال‌شونده شوند. هم‌چنین می‌توان ماده‌ی اصلی آشکارساز را طوری انتخاب کرد که نوترون‌ها در داخل آن کند شده و سپس با مواد فعال‌شونده واکنش دهند.

در انتخاب نوع آشکارساز باید پارامترهایی چون زمان مرگ، انرژی ذره‌ی گسیلیده از رادیوایزوتوپ‌های حاصل از فعال‌سازی و حالت فیزیکی ماده‌ی فعال‌شونده را نیز در نظر گرفت. متداول‌ترین شمارگری که برای این کار انتخاب می‌شود، شمارگر گایگر-مولری است که در اطراف آن برگه‌ی نقره پیچیده شده باشد [۷]. این شمارگر، اگر برای شمارش نوترون‌های تند به کار رود، باید در داخل پلی‌اتیلن و یا پارافین با ضخامت مناسب قرار گیرد. اما مشکل عمده‌ی چنین شمارگری زمان مرگ طولانی است که این امر به ویژگی‌های خود شمارگر برمی‌گردد [۱]. نیم‌عمر رادیوایزوتوپ‌های حاصل از فعال‌سازی مواد مورد استفاده در ساخت شمارگر نیز بسیار مهم است. این نیم‌عمر باید به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا زمان کافی برای شمارش وجود داشته باشد. به طوری که اثر هم‌پوشانی تپ‌ها و زمان مرگ آشکارساز در شمارش اختلال ایجاد نکند.

شمارگرهایی بر مبنای فعال‌سازی سرب، اکسیژن و فلورین براساس به ترتیب واکنش‌های $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ ، $^{19}\text{F}(n,\alpha)^{16}\text{N}$ و $^{207}\text{Pb}(n,n)^{207\text{m}}\text{Pb}$ ساخته شده‌اند. مشکل عمده‌ی دو واکنش آخر مشکل درجه‌بندی به جهت حضور نوترون‌های تشدید است [۲]. از طرف دیگر ^{16}O و ^{19}F به دلیل آستانه‌ی واکنش‌های (n,p) و (n,α) ، به ترتیب، برابر با ۱۰/۲ و ۳ MeV، نسبت به نوترون‌های با انرژی کم‌تر از ۲/۵ MeV حساس نیستند [۳]. در مورد شمارگرهای بر مبنای سرب، حجم شمارگر زیاد

بوده و نسبت به نوترون‌های پراکنده شده‌ی زمینه شدیداً حساس می‌باشد و هم‌چنین به سبب انرژی آستانه‌ی ۱/۶ MeV واکنش، نسبت به نوترون‌های با انرژی ۱/۶ تا ۲/۵ MeV نیز حساس است [۴ و ۵]. به این ترتیب شمارگرهای بر مبنای سرب، شمارش نوترون‌های با انرژی کم‌تر از ۲/۵ MeV را ممکن می‌سازد.

برگه‌های ایندیمی حساسیت کم‌تری نسبت به برگه‌های نقره دارند. انرژی آستانه‌ی واکنش با نوترون‌ها در حدود ۰/۵ MeV است و این امر همانند سرب شمارش نوترون‌های با انرژی کم‌تر از ۲/۵ MeV را در بازه‌ی ۰/۵ تا ۲/۵ MeV امکان‌پذیر می‌سازد [۶].

آرستیک دارای انرژی آستانه‌ی ۱۴ MeV با نوترون‌ها است و از این رو نسبت به نوترون‌های با انرژی ۲/۵ MeV حساس نیست [۶].

آشکارسازهایی بر مبنای فعال‌سازی سدیم موجود در آشکارسازهای یدورسدیم (NaI) از طریق واکنش $^{23}\text{Na}(n,\alpha)^{20}\text{F}$ (با نوترون‌های تند به انرژی ۷ MeV) نیز ساخته شده‌اند که نسبت به نوترون‌های با انرژی کم‌تر از ۷ MeV حساس نیستند [۴]. در نتیجه برای نوترون‌های با انرژی ۲/۵ MeV نیز مناسب نمی‌باشند.

یکی از مناسب‌ترین گزینه‌ها استفاده از سوسوزن پلاستیکی همراه با برگه‌های نقره است. مزایای استفاده از سوسوزن پلاستیکی عبارت‌اند از

- زمان واپاشی بسیار کوتاه (حدود ۳ نانوثانیه)،
- فعال نشدن خود سوسوزن،
- ایفای نقش کندکننده به وسیله‌ی خود سوسوزن به دلیل وجود کربن و هیدروژن در ساختار آن،
- ناچیز بودن سطح مقطع جذب نوترون در پلاستیک در مقایسه با نقره.

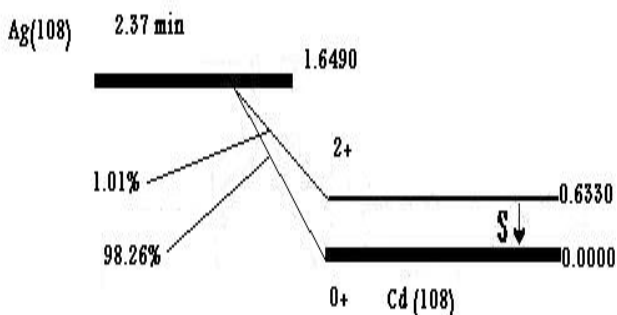
ساختار یک نمونه از این نوع آشکارسازها که در آن نحوه‌ی قرار گرفتن برگه‌های نقره بین صفحات سوسوزن پلاستیکی و هم‌چنین اتصال لوله‌ی تکثیرکننده فوتونی به سلول آشکارسازی نشان داده شده است، در شکل ۱ مشاهده می‌شود [۷].



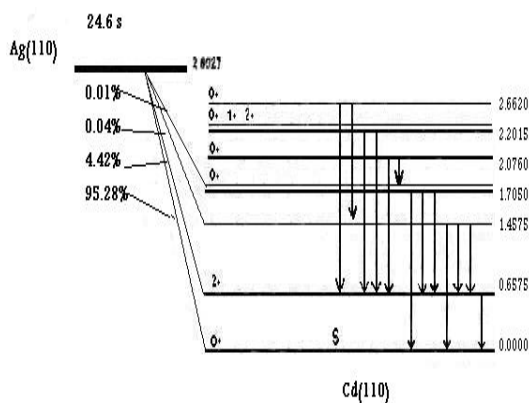
نیم‌عمر دیگر است، در محاسبات ایجاد خطا نخواهد کرد. نمودارهای واپاشی ^{108}Ag و ^{108}Ag در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند.

ضخامت برگه‌های نقره به توجه به برد ذرات بتا، حدود ۳۰۰ میکرون محاسبه گردید. برای محاسبه‌ی تعداد بهینه‌ی برگه‌های نقره، تغییر میزان جذب با افزایش تعداد برگه‌ها محاسبه شد. آنچه در نهایت در سوسوزن پلاستیکی ایجاد سوسوزنی خواهد کرد، ذرات بتا هستند. چون آهنگ تولید ذرات بتا با آهنگ واکنش (n, γ) در برگه‌های نقره متناسب است، با استفاده از کد MCNP4C آهنگ واکنش جذب نوترون در برگه‌های نقره محاسبه شد (محاسبه‌ی مستقیم آهنگ تولید ذرات بتا با کد MCNP مقدور نیست).

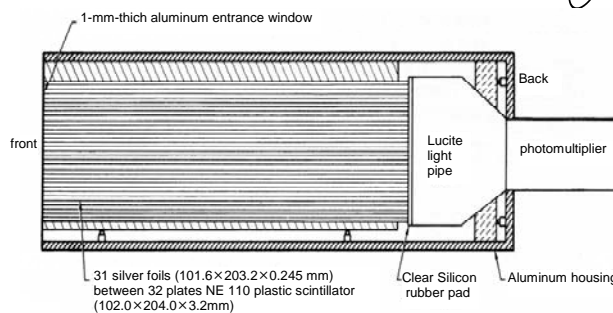
با توجه به ابعاد لوله‌های تکثیرکننده‌ی فوتونی موجود، برای هندسه‌ی اول، ابتدا یک مکعب با یال ۱۰cm و بار دیگر با یال ۷,۵cm و برای هندسه‌ی دوم نیز در مرحله‌ی اول یک استوانه به قطر و ارتفاع ۷,۵cm در نظر گرفته شد که این آخری در مرحله‌ی بعدی به ۱۰cm افزایش یافت.



شکل ۲- نمودار واپاشی ^{108}Ag .



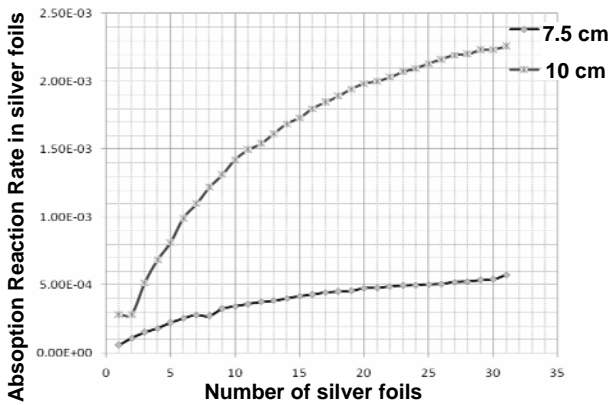
شکل ۳- نمودار واپاشی ^{110}Ag .



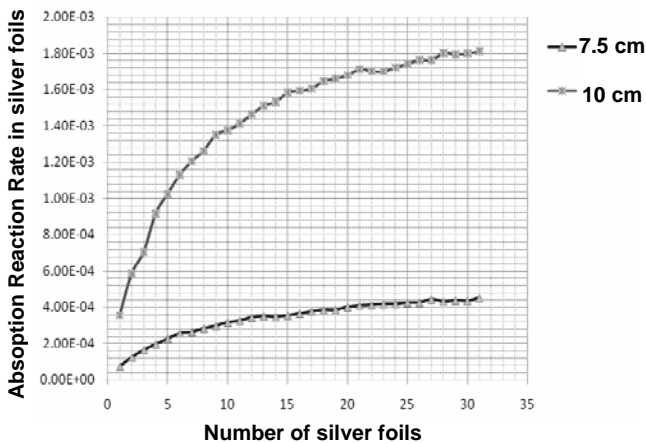
شکل ۱- ساختار یک نمونه از شمارگر فعال‌سازی که در آن نحوه‌ی قرار گرفتن برگه‌های نقره بین صفحات سوسوزن پلاستیکی و همچنین چگونگی اتصال لامپ تکثیرکننده‌ی فوتونی به سلول آشکارسازی دیده می‌شود.

۲- روش محاسبه

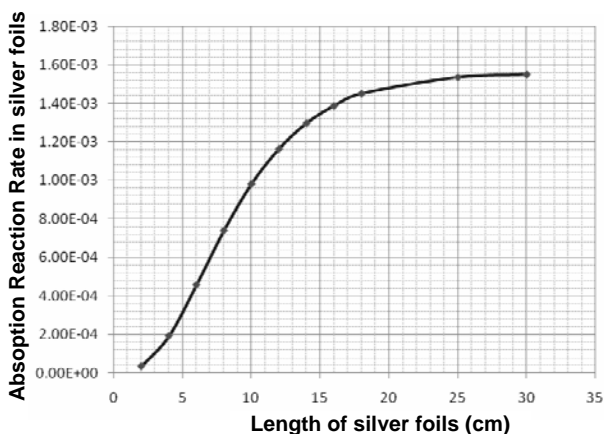
در این شبیه‌سازی از سوسوزن پلاستیکی همراه با برگه‌های نقره استفاده شده است. دو هندسه برای این منظور در نظر گرفته شده است. یکی از هندسه‌ها مکعب می‌باشد که در آن ورقه‌های پلاستیکی و برگه‌های نقره به صورت یک در میان و موازی هم قرار گرفته‌اند. در هندسه‌ی دوم از پوسته‌های استوانه‌ای نقره و پلاستیک قرار گرفته باز هم به صورت یک در میان و هم‌محور، استفاده شده است. در هر دو مورد نوترون‌های تند در سوسوزن نفوذ کرده و کند می‌شوند. از آن جا که سطح مقطع جذب نقره برای نوترون‌های گرمایی زیاد است، به راحتی می‌تواند نوترون‌های کند شده توسط پلاستیک را جذب نماید (سطح مقطع جذب نوترون‌ها در سوسوزن بسیار ناچیز است). نقره دارای دو ایزوتوپ پایدار با اعداد جرمی ۱۰۷ و ۱۰۹ است. با جذب نوترون‌های گرمایی، ^{107}Ag به ^{108}Ag و ^{109}Ag به ^{110}Ag تبدیل می‌شوند. رادیونوکلید ^{108}Ag با واپاشی بتایی به ^{108}Cd تبدیل می‌شود. در این فرایند واپاشی، پرتوهای β^- با انرژی متوسط ۶۲۹keV و با نسبت انشعاب ۹۸,۲۶٪ گسیل می‌شوند که بیشینه انرژی آن‌ها ۱۶۵۰keV می‌باشد. در بقیه‌ی موارد، هسته‌ها با گسیل الکترون منفی به انرژی متوسط ۳۵۶keV و با بیشینه انرژی ۱۰۱۷keV به حالت برانگیخته‌ی ^{110}Cd به انرژی ۶۳۲,۹۸keV واپاشیده می‌شوند که خود با گسیل پرتو γ به انرژی ۶۳۲,۹۸keV به حالت پایه‌ی ^{110}Cd فروپاشیده می‌شود. نیم‌عمر این واپاشی ۲,۳۷ دقیقه است. رادیونوکلیدهای ^{110}Ag و ^{110m}Ag با نیم‌عمرهای، به ترتیب، برابر با ۲۴ ثانیه و ۲۴۹,۷۹ روز به ^{110}Cd واپاشیده می‌شوند. چون نیم‌عمر واپاشی رادیونوکلید ^{110m}Ag بسیار طولانی‌تر از دو



شکل ۴- تأثیر افزایش تعداد برگه‌های نقره بر آهنگ جذب (هندسه‌ی مکعبی). منحنی پایینی (آبی رنگ): سلول با ابعاد ۷٫۵ سانتی‌متر و منحنی بالایی (قرمز رنگ): سلول با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر.



شکل ۵- تأثیر افزایش تعداد برگه‌های نقره بر آهنگ جذب هندسه‌ی استوانه‌ای. منحنی پایینی (آبی رنگ): سلول با ابعاد ۷٫۵ سانتی‌متر و منحنی بالایی (قرمز رنگ): سلول با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر.



شکل ۶- تأثیر افزایش طول شمارگر بر آهنگ جذب در برگه‌های نقره (هندسه‌ی مکعب مستطیلی).

به این ترتیب، تعداد بهینه‌ی برگه‌ها برای رسیدن به بازدهی مناسب به دست آمد. در هر دو هندسه با توجه به ابعاد مختلف، خروجی‌های نرم‌افزار برای انرژی ۲٫۵ MeV (واکنش D+D) محاسبه شده است. در هر دو هندسه، فاصله‌ی چشمه از شمارنده ۱۰ cm در نظر گرفته شد.

پس از محاسبه‌ی تعداد بهینه‌ی برگه‌ها، طول شمارگر برای رسیدن به بازدهی مناسب محاسبه شد. نظر به این که در هر دو مورد، افزایش تعداد برگه‌ها در حجم ثابت صورت گرفته است، در عمل به طور غیرمستقیم ضخامت پلاستیک‌ها برای رسیدن به بازدهی مناسب بررسی شده است.

۳- نتایج محاسبه

نتایج به دست آمده از خروجی‌های کد MCNP گویای این واقعیت است که در هر دو هندسه‌ی استوانه‌ای و مکعبی، بازده مکعب با یال ۷٫۵ cm و یا استوانه به قطر و ارتفاع ۷٫۵ cm نسبت به مکعب با یال ۱۰ cm و یا استوانه به قطر و ارتفاع ۱۰ cm کم‌تر است. خطای محاسبات با تعداد یک میلیون واقعه، در حدود ۳٪ به دست آمد. همان‌طور که شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهند، آهنگ واکنش جذب در برگه‌های نقره با افزایش تعداد برگه‌ها با شیب نسبتاً تند شروع به افزایش می‌کند و در نهایت با افزایش بیش‌تر تعداد برگه‌ها این شیب کاهش می‌یابد. در هندسه‌ی مکعبی تعداد برگه‌هایی که آهنگ واکنش جذب در آن به مقدار نسبتاً ثابتی رسید، در حدود ۲۰ برگه بود. این در حالی است که در حالت استوانه‌ای با تعداد ۱۰ برگه به روند نسبتاً ثابت با بازده مشابه مکعبی می‌رسیم. از طرف دیگر، هندسه‌ی استوانه‌ای شیب کم‌تری نسبت به هندسه‌ی مکعبی دارد (شکل ۴ و ۵).

پس از محاسبه‌ی تعداد برگه‌های بهینه، با افزایش طول شمارگر در دو هندسه‌ی مختلف پیشنهادی، اندازه‌ی ارتفاع استوانه و طول مکعب (مستطیل) نیز محاسبه شد. این طول با توجه به شکل‌های ۶ و ۷ در حدود ۱۴ cm به دست آمد.

در شکل ۸ طرح اساسی شمارنده‌ی ساخته شده نشان داده شده است. در این شکل، مجموعه‌ی سوسوزن پلاستیکی و برگه‌های نقره در کنار لوله‌ی تکثیرکننده‌ی فوتونی دیده می‌شود.

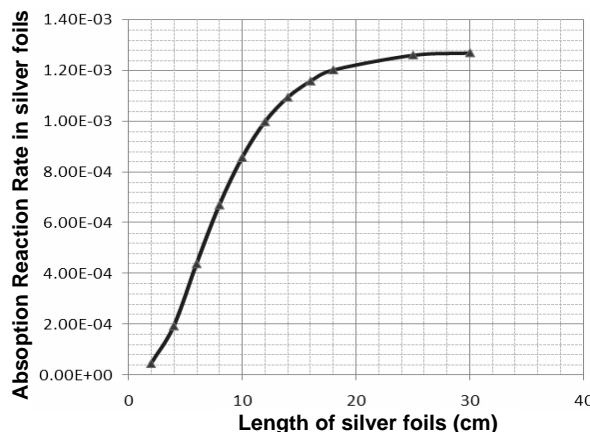


مناسب‌تر مجموعه‌ی سلول و لوله‌ی تکثیرکننده‌ی فوتونی،
 هندسه‌ی مکعب مستطیلی پیشنهاد می‌گردد.

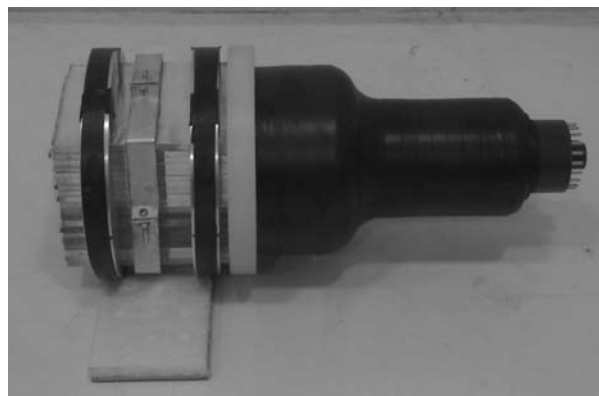
با توجه به آزمایش‌های انجام شده بهره‌ی نوترونی دستگاه
 پلاسمای کانونی SBUPF1 با استفاده از این شمارگر
 $1.0^7 \times 3.71$ نوترون به ازای هر تپ به دست آمد.

References:

1. F.J. Mayer and H. Brysk, "Neutron detection efficiency of silver counters," Nuclear Instruments & Methods, **125**, 323-324 (1975).
2. M.S. Rowland and J.C. Robertson, "A fast neutron activation detector for pulsed sources," Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, **224**, 322-323 (1984).
3. Richard H. Howell, "A highly energy-selective activation detector for pulsed fusion neutron sources," Nuclear Instruments & Methods, **148**, 39-42 (1978).
4. V.E. Lewis and T.B. Ryves, "Measurement of D+T neutron pulses," Nuclear Instruments & Methods, **A257**, 462-466 (1987).
5. Lawrence Ruby and Joseph B. Rechen, "A fast neutron activation detector for 14-MeV pulsed neutron sources," Nuclear Instruments & Methods, **15**, 74-76 (1962).
6. E.L. Jacobs, "An arsenic-activation detector for bursts of 2.5 and 14MeV Neutrons," Nuclear Instruments & Methods, **213**, 387-392 (1983).
7. Dennis R. Slaughter and William L. Pickles, "A highly sensitive silver activation detector for pulsed neutron source," Nuclear Instruments & Methods, **160**, 87-92 (1979).
8. B. Shirany, "Optimization of neutron yield in SBUMTPF1 plasma focus device," M. Sc. Thesis, Shahid Beheshti University (2008).



شکل ۷- تأثیر افزایش طول شمارگر بر آهنگ جذب در برگه‌های نقره
 (هندسه‌ی استوانه‌ای).



شکل ۸- طرح اساسی مجموعه‌ی سوسوزن پلاستیکی و برگه‌های نقره به
 همراه لوله‌ی تکثیرکننده‌ی فوتونی.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این شبیه‌سازی مشخص شد که در هر دو هندسه‌ی استوانه‌ای و
 مکعب مستطیلی، افزایش بیشتر برگه‌های نقره نسبت به تعداد
 بهینه‌ی حاصل از محاسبه، تأثیر زیادی در روند افزایش آهنگ
 جذب ندارد. از این رو برای ساخت سلول آشکار ساز ۲۰ برگه
 کافی است.

ساخت هر دو هندسه‌ی شبیه‌سازی شده در عمل امکان‌پذیر
 می‌باشد و هندسه‌ای مناسب‌تر است که با هزینه‌ی کم‌تر جواب
 بهتری بدهد. با توجه به هزینه‌ی برش، ماشین‌کاری و صیقل
 پلاستیک‌ها، استفاده از هندسه‌ی مکعب مستطیلی اقتصادی‌تر
 است. لذا با توجه به بهینه بودن ابعاد سلول و تعداد برگه‌های نقره
 و استفاده از مقدار مناسبی از سوسوزن پلاستیکی،
 سهولت ماشین‌کاری، صیقل سطح آن‌ها و در نهایت اتصال