



## اندازه‌گیری شار نوترون $14.8 \text{ MeV}$ در یک دستگاه مولد نوترون با استفاده از روش فعال‌سازی با نوترون

صدیقه کاشیان، جواد رحیقی\*، مهرداد عزیزی شمامی، حسین قدس  
پژوهشکده علوم هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

**چکیده:** اندازه‌گیری شار نوترون، با روش فعال‌سازی با نوترون بوسیله پولکهای مس و نیکل انجام گرفته است. با پرتودهی پولک مس و نیکل، ایزوتوپ‌های  $^{62}\text{Cu}$ ،  $^{57}\text{Ni}$  از طریق دو واکنش  $^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$ ،  $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$  به ترتیب با نیمه‌عمرهای  $9.74$  دقیقه و  $36$  ساعت تولید می‌شوند. انرژی پرتوهای گامای ساطع شده در این واکنشها بترتیب  $511 \text{ keV}$  و  $1377 \text{ keV}$  است. با اندازه‌گیری میزان آکتیویته هر پولک در مدت پرتودهی، شار نوترون حساب شده است. این شار از واکنش D-T و با جریان دوتریون  $60 \mu\text{A}$  با استفاده از پولک مس، برابر  $2.64 \times 10^7 \pm 3\%$  بر روی هدف بدست آمد.

**واژه‌های کلیدی:** مولد نوترون، شار نوترون، آشکارسازهای آستانه‌ای

## Measurement of 14.8 MeV Neutron Flux of a Neutron Generator Using Neutron Activation Technique

S. Kashian, J. Rahighi\*, M. Azizi Shamami, H. Ghods  
Nuclear Science Research School, AEOI, P.O. Box: 11365-3486, Tehran - Iran

**Abstract:** Fast neutron flux (14.8 MeV) of a neutron generator has been measured by activation technique. The measurements performed using Cu and Ni threshold detectors.  $^{62}\text{Cu}$  and  $^{57}\text{Ni}$  were produced through  $^{63}\text{Cu}(n, 2n)^{62}\text{Cu}$  and  $^{58}\text{Ni}(n, 2n)^{57}\text{Ni}$  reactions. They decay by emitting 511 keV and 1377 keV gamma rays, respectively. The half life of  $^{62}\text{Cu}$  is 9.74min and that of  $^{57}\text{Ni}$  is 36 hours. The flux of neutron has been calculated by measuring the activity after the irradiation time. Gamma spectroscopy of the activated foils was performed using a HPGe detector. By employing this technique the neutron flux of  $2.64 \times 10^7 \pm 3\%$  n/s was obtained for 60  $\mu\text{A}$  deuteron of 110 keV energy, bombarding a solid target of  $^3\text{H}$ .

**Keywords:** Neutron Generator, Neutron Flux, Threshold Detectors

\*email: jrahighi@aeoi.org.ir



## ۱- مقدمه

نوترون  $14\text{MeV}$ ، تولید شده بوسیله دستگاه مولد نوترون، در اندازه‌گیریهای مختلف هسته‌ای کاربردهای گوناگونی از جمله: آنالیز کمی به روش فعال‌سازی با نوترون، رادیوگرافی با نوترون دارد، به همین جهت اطلاعات مربوط به شار نوترون از اهمیت زیادی برخوردار است.

برای اندازه‌گیری شار نوترون روش‌های مختلفی وجود دارد که از جمله، اندازه‌گیری شار با استفاده از ذره همراه  $^{(1)} [1, 2]$  و  $^{(3)}$ ، همچنین استفاده از روش فعال‌سازی با نوترون  $[1 \text{ تا } 5]$  و بکارگیری برخی آشکارسازهای نوترون مانند سوسونهای آلی مایع است  $[1 \text{ تا } 4]$ .

در دستگاه مولد نوترون موجود در گروه فیزیک نوترون سازمان انرژی اتمی ایران از واکنش  $^2_1H + ^3_1H \rightarrow ^1_0n + ^4_2He$  برای تولید نوترون استفاده می‌شود و به دلیل مسدود بودن محل قرار گرفتن هدف، استفاده از آشکارساز ذره آلفا که همراه با نوترون می‌شود برای اندازه‌گیری شار نوترون امکان‌پذیر نیست. بهترین آشکارسازی که برای آشکار ساختن و اندازه‌گیری شار نوترون می‌توان از آن استفاده کرد، سوسون آلی مایع است که به سبب داشتن بازده مناسب (حدود ۱۰٪)، حساسیت کم نسبت به پرتو گاما و توان جداسازی نوترون از گاما، آشکارساز مناسبی برای نوترونهای سریع است. اساس کار سوسونهای آلی بر پایه پس‌زنی پروتون است. نوترون پس از برخورد با پروتون پراکنده شده گستره‌پیوسته‌ای از انرژی E (انرژی اولیه نوترون) تا کمترین مقدار (صفر) خواهد داشت.

طیف حاصل از مولد نوترون شامل نوترونهایی با انرژی  $3\text{MeV}$  و  $14\text{MeV}$  است که بترتیب حاصل واکنشهای D-D (ناشی از دوتریوم‌های کاشته شده در هدف بوسیله باریکه) و D-T است. بدلیل عدم توانایی آشکارساز در شمارش نوترونهای پربسامد (حداکثر  $10^6\text{C/S}$ ) از این نوع آشکارساز برای اندازه‌گیری میزان شار نمی‌توان استفاده کرد.

آشکارسازی نوترون با آشکارسازهای آستانه‌ای بر پایه تولید یک رادیوایزوتوپ، به وسیله اندرکنش با نوترون و شمارش تابش گسیل شده از آن است. آشکارسازهای آستانه‌ای به صورت پولک یا سیم فلزی هستند و در اندازه‌گیریهای شار میدان نوترونی اهمیت خاصی دارند که بسته به انرژی نوترون از

پولک‌های مختلف که دارای انرژی آستانه‌ای متناسب با انرژی نوترون موردنظر باشند، استفاده می‌شود.

بطور کلی، واکنشهای آستانه‌ای بر پایه گستره انرژی نوترون و تجهیزات شمارش که در دسترس قرار دارند انتخاب می‌شوند، ولی معیارهایی وجود دارند که موجب ارجحیت بعضی از واکنشها می‌شوند، از جمله:

- سطح مقطع انجام واکنش به صورت تابعی از انرژی باید به خوبی شناخته شده باشد.
- نوع، انرژی و نسبت شاخه‌ای  $^{(2)}$  تابشهای گسیل شده از فرآورده واکنش کاملاً معلوم باشد.
- نیمه‌عمر رادیوایزوتوپ تولیدی باید به خوبی معلوم و حداقل چند دقیقه باشد، تا فرصت انتقال پولک به مکانی که تجهیزات شمارش در آن قرار دارند وجود داشته باشد.

## ۲- اساس روش فعال‌سازی با نوترون

هرگاه یک پولک در میدان نوترونی قرار گیرد، آکتیویته آن در پایان مدت پرتودهی از رابطه زیر بدست می‌آید  $[1]$ :

$$A = N\phi\sigma(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1)$$

که در آن:

A: تعداد واپاشی در واحد زمان (Bq)

N: تعداد هسته‌های موجود در پولک

$\phi$ : شار نوترون در میدان نوترونی  $\frac{n}{\text{cm} \cdot \text{s}}$

$\sigma$ : سطح مقطع واکنش ( $\text{cm}^2$ )

$\lambda$ : ثابت واپاشی (1/s)

بطور کلی، تعداد واپاشی‌ها، از رابطه (۲) بدست می‌آید  $[1]$ .

$$G_k = \varepsilon_k e_k F \Omega \frac{N \phi \sigma}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_c}) + B \quad (2)$$

که در آن:

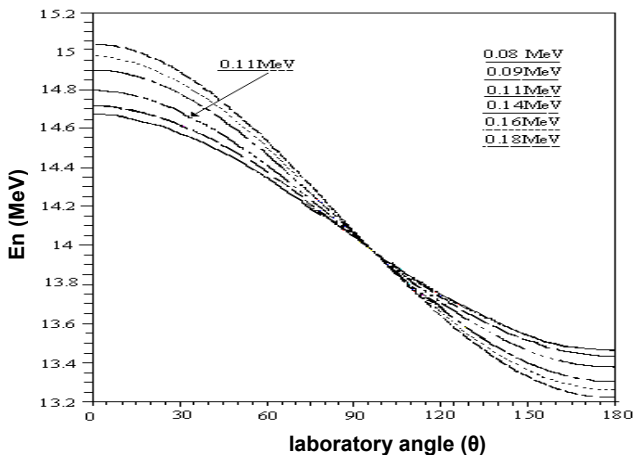
B: شمارش زمینه

$\varepsilon_k$ : درصد شاخه‌ای (احتمال گسیل ذرات با انرژی  $E_k$ )

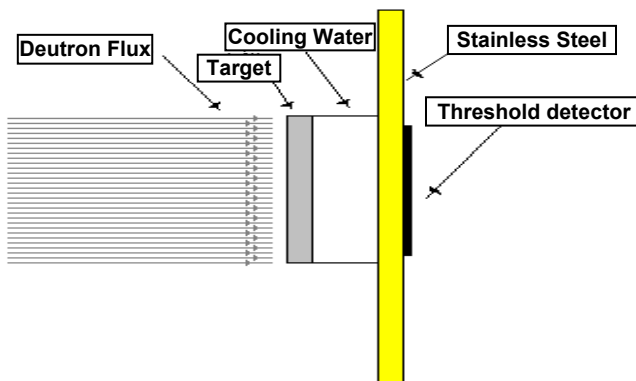
$\varepsilon_k$ : بازده آشکارساز برای انرژی  $E_k$

$\Omega$ : زاویه فضایی بین آشکارساز و پولک

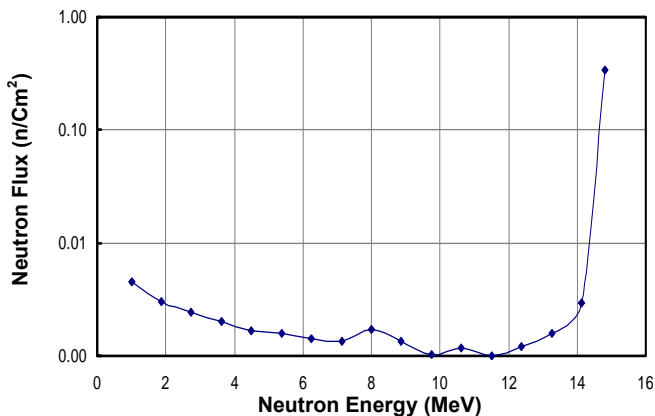
دوترون و تریتیوم در زاویه نزدیک به صفر اتفاق می‌افتند (شکل ۲). محاسبه نشان می‌دهد که طیف انرژی نوترون پس از عبور از پوشش فولادی حدود ۲ میلی‌متر، از خنک‌کننده آب حدود ۵ میلی‌متر و از پوشش پلاستیکی که پولک در آن قرار گرفته، مطابق شکل ۳ است.



شکل ۱- نمودار تغییرات انرژی نوترون برحسب زوایای مختلف برخورد دوترون به تریتیوم در انرژیهای مختلف دوترون.



شکل ۲- طرز قرار گرفتن هدف در مقابل شار دوترون.



شکل ۳- طیف انرژی نوترون پس از عبور از پوشش فولادی و آب و پوشش پلاستیکی.

$t_i$ : مدت پرتودهی

$t_d$ : مدت خنک شدن

$t_c$ : مدت شمارش

F: ضریب‌های تصحیحاتی از جمله پس پراکندگی و خود جذب است.

### ۳- روش اندازه‌گیری شار نوترون

مولد نوترون موجود در پژوهشکده علوم هسته‌ای با استفاده از واکنش  ${}^3\text{H}(\text{d},\text{n}){}^4\text{He}$ ، نوترون تولید می‌کند. این واکنش انرژی‌زا است. مقدار انرژی آزاد شده در آن، با صرف نظر کردن از انرژی اولیه دوترون، برابر  $Q=17/58\text{MeV}$  است. بزرگترین سطح مقطع انجام واکنش در دوترون با انرژی  $E_d=110\text{keV}$ ، برابر ۵ بارن است [۶].

این مولد نوترون شامل یک لوله شتابدهنده است که در آن دوترونها شتابدار می‌شوند. بوسیله شتابدهنده‌ها با واکنش D-T می‌توان نوترون‌هایی با انرژی ۱۴ MeV تا ۳۰ MeV (بسته به انرژی دوترون) تولید کرد.

سیستم خلاء دستگاه مولد نوترون شامل یک پمپ دیفیوژیون و یک پمپ مکانیکی است، به کمک این سیستم می‌توان به خلاء حدود  $2 \times 10^{-7}$  Torr دست یافت. یکی از مشکلات استفاده از پمپ دیفیوژیون وجود اجتناب‌ناپذیر بخار روغن در خلاء است، که پس از چند ساعت بمباران، لایه نازکی از روغن (با ضخامتی در حدود میکرون) سطح هدف را می‌پوشاند. انرژی که دوترون در این ضخامت لایه روغن از دست می‌دهد، حدود  $20\text{keV}$  است. در این اندازه‌گیری انرژی دوترون در حدود  $130\text{keV}$  تا  $140\text{keV}$  است، در اینصورت انرژی مؤثر دوترون ورودی در حدود  $110-120\text{keV}$  خواهد بود. نمودار تغییرات انرژی دوترون برحسب زوایای مختلف برخورد دوترون و تریتیوم  $\text{D}(\text{T},{}^4\text{He})\text{n}$  در شکل ۱ نشان داده شده است. انرژی نوترون تولیدی در زاویه صفر درجه برای دوترون با انرژی  $110\text{keV}$  برابر  $14/8\text{MeV}$  است. [۷]

هدف تریتیوم بکار رفته در این دستگاه مولد نوترون، یک صفحه مسی است که یک روی آن با فلز تیتانیوم پوشانده شده و حدود چند کوری تریتیوم در آن جذب شده است. این هدف دارای قطری حدود  $2/6$  سانتی‌متر و ضخامتی حدود ۲ میلی‌متر است، با توجه به این نکته که چون طول لوله شتابدهنده دوترون  $1/5$  متر است می‌توان در نظر گرفت که تمام برخوردهای

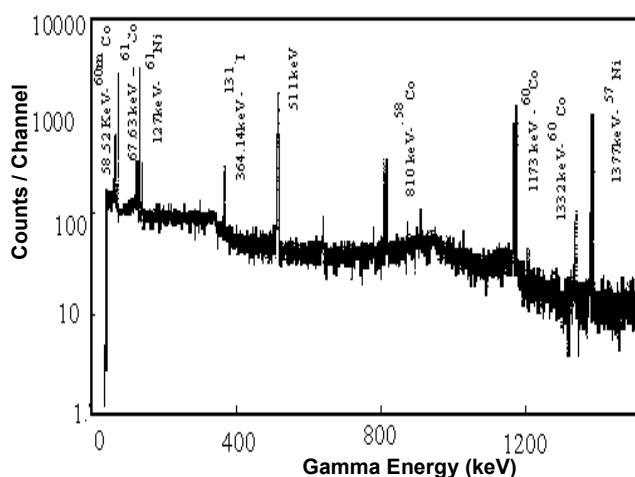


برابرند، می‌توان نتیجه گرفت که این پولک  $2\pi$  رادیان از فضای اطراف هدف را می‌پوشاند، همچنین با در نظر گرفتن برابری مساحت پولک و هدف می‌توان شار نوترون را برحسب  $n/s$  حساب کرد. برای محاسبه شار نوترون از طریق اندازه‌گیری آکتیویته پولک سطح مقطع برهمکنش نوترون با پولک مورد نیاز است. با در نظر گرفتن پیچیدگی طیف انرژی نوترون و با توجه به انرژی آستانه هر یک از پولک‌ها، همچنین میزان نوترون تولیدی در هر بازه انرژی، این محاسبه توسط کد MCNP 4C صورت گرفته است. در نهایت برای محاسبه سطح مقطع کل، روی گستره انرژی مورد نظر انتگرال گیری صورت گرفت.

طیف گامای بدست آمده از واپاشی پولک نیکل در شکل ۴ نشان داده شده است.

نتیجه در جدول شماره ۱ مندرج است.

در مدت پرتودهی پولک نیکل جریان روی هدف  $240 \pm 5 \mu A$  بود. خطای اندازه‌گیری شامل خطای شمارش و خطای اندازه‌گیری کارایی آشکارساز و همچنین خطای سطح مقطع انجام واکنش است. با توجه به اینکه نیکل دارای نیمه‌عمر طولانی (۳۶ ساعت) است و برای استفاده از آن باید مدت پرتودهی زیاد باشد به همین جهت در اندازه‌گیری شارش در جریانهای کمتر، از پولک مس استفاده شد.



شکل ۴- طیف انرژی پرتوی گامای حاصل از واپاشی پولک نیکل.

جدول ۱- شار نوترون  $14 \text{ MeV}$  اندازه‌گیری شده با استفاده از پولک نیکل.

شار نوترون $14 \text{ MeV}$ (n/s)	خطای نسبی اندازه‌گیری شار (%)
$8/19 * 10^7$	$\pm 3/32$

محاسبه به روش مونت کارلو و با کمک نرم‌افزار MCNP 4C انجام گرفته است و نشان می‌دهد که بیش از ۹۲ درصد نوترون‌ها در انرژی تغییری نداشته‌اند.

در این اندازه‌گیری از پولک‌های مس و نیکل استفاده شد. علت استفاده از این پولک‌ها به جهت انرژی آستانه این پولک‌ها است، که برای مس در حدود  $12/4 \text{ MeV}$  و برای نیکل در حدود  $13/5 \text{ MeV}$  و در انرژیهای کمتر سطح مقطع واکنش صفر است. [۷]

قبل از قرار دادن پولک‌ها درون پوشش پلاستیکی، به منظور حذف هر گونه آلودگی در اثر تماس با دست، آنها را با استون شسته، سپس به دقت توزین شده‌اند. این پوشش به قسمت فولادی جلوی هدف چسبانده شد و پس از پرتودهی، برای حذف پرتوهای گامای ناخالصی‌های پوشش پلاستیکی، پولک به درون پوشش پلاستیکی جدیدی منتقل شد.

برای اندازه‌گیری آکتیویته پولک‌های مس و نیکل از آشکارساز HPGe استفاده شد. برای کالیبره کردن بازه این آشکارساز، از چشمه‌های قرصی شکل که دارای هندسه یکسان با نمونه‌ها بودند استفاده شده است. چشمه‌هایی که برای کالیبره کردن بازه از آنها استفاده شد عبارتند از:  $^{60}\text{Co}$ ،  $^{133}\text{Ba}$ ،  $^{137}\text{Cs}$ ،  $^{109}\text{Cd}$ ،  $^{54}\text{Mn}$ ،  $^{57}\text{Co}$  که محدوده انرژی  $80 \text{ keV}$  تا  $1332 \text{ keV}$  را به خوبی پوشش می‌دهند [۸]. چون پولک‌ها بر روی سطح آشکارساز شمارش می‌شدند، کالیبره کردن بازه نیز بر سطح آشکارساز صورت گرفت. با جمع کردن شمارش هر کانال و کم کردن شمارش زمینه از آن، شمارش خالص بدست می‌آید.

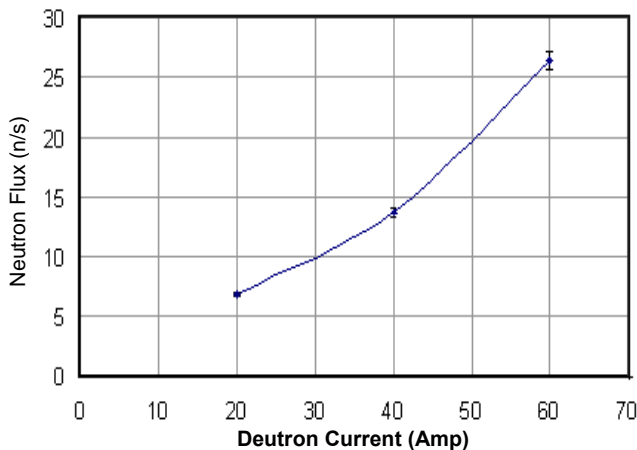
#### ۴- نتایج

مقدار جریان بر روی هدف، در حقیقت نشان‌دهنده تعداد دوترون‌های رسیده به هدف است، هر چه جریان دوترون بیشتر باشد، آهنگ اندرکنش آن با تریتیوم موجود در هدف بیشتر می‌شود و تولید نوترون افزایش می‌یابد. بنابراین ارتباط مستقیمی بین جریان روی هدف و شار نوترون وجود دارد؛ ابتدا شار نوترون با یک پولک نیکل اندازه‌گیری شد.

با توجه به این نکته که پولک روی سطح پوشش فولادی مقابل هدف چسبانده شده است و مساحت پولک و هدف تقریباً

جدول ۲- شار نوترون ۱۴ MeV اندازه‌گیری شده در جریانهای مختلف دوترون.

جریان هدف ( $\mu\text{A}$ )	شار نوترون ۱۴ MeV (n/s)	خطای نسبی (اندازه‌گیری شار (%))
۲۰	$6/85 \times 10^6$	$\pm 3/16$
۴۰	$13/7 \times 10^6$	$\pm 3/04$
۶۰	$26/4 \times 10^6$	$\pm 3/04$



شکل ۵- نمودار تغییرات شار نوترون برحسب جریان دوترون  $^2\text{H}$  با هدف  $^3\text{H}$ .

### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از آقایان فرهاد ذنوبی و حسن زندی که در مدت این تحقیق در تعمیر و نگهداری مولد نوترون تلاش بی‌وقفه‌ای داشته‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

### پی‌نوشت‌ها:

- ۱- Associated Particle Technique
- ۲- Branching Ratio
- ۳- Implant

برای بررسی تغییرات شارش نوترون برحسب جریان، سه پولک مس در شار نوترون حاصل از جریان‌های  $20\ \mu\text{A}$ ،  $40\ \mu\text{A}$  و  $60\ \mu\text{A}$  قرار داده شدند. نتایج در جدول ۲ آورده شده است.

### ۵- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج اندازه‌گیری شار مولد نوترون با استفاده از روش فعال‌سازی با نوترون و با توجه به کهنه بودن هدف با مقادیری که در مراجع به ازای دوترون با انرژی  $120\ \text{keV}$  بهره نوترون  $9 \times 10^9\ \text{n/MA.s}$  آمده است، سازگاری خوبی دارد و با توجه به میزان خطای ۳٪ که در این روش وجود دارد، می‌توان گفت، یکی از بهترین روشهای اندازه‌گیری شار، استفاده از آشکارسازهای آستانه (پولکها) است.

بخشی از باریکه دوترون که انرژی کافی برای نفوذ در لایه تیتانیوم را خواهد داشت در این لایه کاشته<sup>(۳)</sup> می‌شود. مقدار دوترون کاشته شده در هدف با گذشت زمان افزایش می‌یابد، از اینرو احتمال انجام واکنش D-D با کهنه شدن هدف تریتیوم افزایش خواهد یافت. انرژی نوترون حاصل از واکنش D-D  $3\ \text{MeV}$  است. استفاده از واکنشهای آستانه‌ای، امکان تداخل بین شار نوترون  $3\ \text{MeV}$  را در شار موردنظر  $14/8\ \text{MeV}$  از بین می‌برد. بدین ترتیب مزیت این روش در مواقعی که میدان نوترونی از گروههای مختلف انرژی تشکیل شده باشد، روشن است.

تغییرات شار برحسب جریان دوترون در یک ولتاژ کار ثابت، خطی است و با افزایش جریان دوترون افزایش می‌یابد. نمودار شکل ۵ بطوریکه ملاحظه می‌شود، کاملاً خطی نیست. رفتار غیرخطی شار نوترون برحسب جریان دوترون بدلیل کهنه بودن هدف است. در هر مرحله از آزمایش با انحراف باریکه دوترون و برخورد آن به قسمتهای مختلف هدف، تریتیوم موجود در آن قسمت، مصرف می‌شود. به همین دلیل، کاهش تریتیوم موجود در سطح هدف به صورت یکنواخت نیست. برحسب اینکه باریکه دوترون به قسمتهایی با تریتیوم بیشتر یا کمتر برخورد کند، تغییرات شار مشاهده می‌شود، که باعث بوجود آمدن این رفتار غیرخطی خواهد شد. انتظار می‌رود، با بکارگیری هدف نو این رفتار مشاهده نشود.



## References:

1. ن. سولفانیدیس، مترجمین دکتر رحیم کوهی مقدم، دکتر محمدهادی هادی‌زاده‌یزدی، "اندازه‌گیری و آشکارسازی تابش‌های هسته‌ای"، ناشر کتابستان مشهد، صفحات ۶۳۳-۶۲۸، ۶۳۵، ۶۴۷-۶۵۴ (۱۳۷۱).
2. ک.ا.ج. بکرتس، مترجمین دکتر علی پذیرنده، دکتر علی افشار بکشلو، "فیزیک نوترون"، ناشر دانشگاه تهران، صفحات ۱۳۴-۴۶۹، ۱۲۹-۴۹۲ (۱۳۵۲).
3. Marion, Fowler, "Fast Neutron Physics," Part 1, New York, 647, 662-668, 690-692 (1960).
4. Glenn F. Knoll, "Radiation detection and measurement, 2nd edition," Vol. I, II, John Wiley & Sons, 324, 327-328, 703-710 (1978).
5. Kuijpers. R. Herzing, P.Cloth, D. Filges, Hecker, "On the determination of fast neutron spectra with activation techniques," It's application in a fusion reactor blanket model, Nuclear Instrument and Method, 144-215 (1975).
6. J. Csikai, "CRC handbook of fast neutron generators," John Willey & Sons, 5,74-76, 94-96 (1987).
7. International Atomic Energy Agency, "Handbook on nuclear activation data," Vienna, 347-353 (1987).
8. Richard B. Fireston, "Table of Isotopes, 8th edition," Vol. I,II, Virginia S. Shirley, 255-256, 290-291(1998).