

## اندازه‌گیری طیف انرژی نوترون‌های سریع در واکنش D+Be

فریدون عباسی‌دوانی<sup>۱</sup>، غلامرضا اطاعتی<sup>۲</sup>، حسین آفریده<sup>۳</sup>، رحیم کوهی‌فایق<sup>۴</sup> و غلامرضا اصلانی<sup>۵</sup>

- ۱- دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- ۲- انستیتو فیزیک کاربردی دانشگاه علم و صنعت
- ۳- سازمان انرژی اتمی
- ۴- دانشگاه فردوسی مشهد
- ۵- مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای کرج

دریافت نسخه نهایی: ۸۰/۱۱/۲۱

دریافت مقاله: ۸۰/۲/۸

### چکیده

در این مقاله اندازه‌گیری طیف انرژی نوترون، حاصل از برهم‌کنش دوترون‌های شتاب داده شده به وسیله سیکلوترون با هدف بریلیوم، گزارش شده است. انرژی دوترون‌ها ۷، ۱۰، ۱۳ و ۱۵ میلیون الکترون‌ولت انتخاب شده و طیف انرژی نوترون در زاویه‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درجه نسبت به راستای باریکه دوترون، اندازه‌گیری شده است. آشکارساز مورد استفاده از نوع سوسوزن مایع NE-213 استوانه‌ای شکل و با قطر و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر می‌باشد. در این آزمایش طیف‌های نوترون و گاما با تکنیک تبعیض شکل تپ (P.S.D) و روش زمان‌گذر از صفر از هم جدا شده‌اند. از کدهای O5S و RESPMG به ترتیب برای تولید تابع پاسخ و ماتریس پاسخ آشکارساز در انرژی‌های مختلف استفاده شده و در نهایت با کد FORIST عمل بازیافت طیف نوترون از پروتون پس زده انجام گرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** پرتابه دوترون، بریلیوم، طیف انرژی نوترون، کد FORIST

### ۱. مقدمه

واکنشی به جز واکنش  ${}^9\text{Be}(d,n){}^8\text{B}$  مقدار  $Q$  منفی است و واکنشها دارای انرژی آستانه هستند. بنابراین در انرژیهای  $E_d < 2\text{MeV}$  با واکنش  ${}^9\text{Be}(d,n){}^8\text{B}$  می‌توان چشمه تک انرژی نوترون سریع تولید کرد. علاوه بر تولید نوترون در این برهم‌کنش، گامای زیادی نیز تولید می‌شود و چون سوسوزن مورد استفاده هم به نوترون و هم به گاما حساس است، باید آنها را از هم تفکیک کرد. شکل تپ نوترون و گاما در سوسوزن مورد استفاده متفاوت است. تپهای حاصل از گاما سریعتر صفر می‌شوند. بنابراین با بهره‌گیری از روش تبعیض شکل تپ (P.S.D) تپ نوترون‌ها از تپ گاماها قابل جداسازی است [۳].

از جمله روشهای تولید نوترون سریع، برهم‌کنش دوترون‌های پر انرژی با هدفهای سبک مانند بریلیوم است. این نوترون‌ها طیف گسترده‌ای دارند و از آنها در نوترون درمانی و رادیو بیولوژی بسیار استفاده می‌شود [۱ و ۲]. نکته قابل توجه در برهم‌کنش D+Be، باز شدن کانالهای واکنشی متعدد در انرژیهای بیش از ۲ MeV است که نوترونهایی با انرژی متفاوت تولید می‌کند. در نتیجه گستردگی زیادی در طیف انرژی نوترون‌های این برهم‌کنش ایجاد می‌شود. طبق کانالهای واکنشی معرفی شده در جدول ۱ [۱] مشاهده می‌شود که برای تمام کانالهای

کم انجام شد نیازی به استفاده از دستگاه خنک کننده پیش نیامد.

برای اندازه گیری طیف انرژی نوترون و جداسازی تپهای نوترون و گاما از یک سلول استوانه ای آشکار ساز سوسوزن مایع NE-213 با قطر و ارتفاع ۷۶ میلیمتر استفاده شده است. این سلول با واسطه یک نوربر به شکل مخروط ناقص به تکثیر کننده نوری ۲ اینچ مدل ۸۵۷۵ RCA همراه با حفاظ مغناطیسی مربوطه متصل می گردد. بازده آشکارساز به روش مونت کارلو برای انرژیهای ۱ MeV تا ۲۰ MeV با آستانه صفر، ۳۰ keV و ۱ MeV به دست آمده و در شکل ۱ نشان داده شده است. طراحی و ساخت سلول، نوربر، مقسم های ولتاژ و برپایی کلی آشکارساز توسط نویسندگان مقاله انجام شده است. از یک شمارنده بزرگ BF<sub>۳</sub> به عنوان مرجع شمارش نوترون ها استفاده شده است. کُد O5S برای تولید توابع پاسخ آشکارساز و کُد RESPMG برای تشکیل ماتریس پاسخ از توابع پاسخ، به کار رفته و در نهایت با کُد FORIST عمل بازیافت طیف نوترون از پروتون پس زده انجام گرفته است.

### ۱.۳. روش جداسازی طیف نوترون از گاما

برای جداسازی طیف نوترون از گاما روش تفکیک شکل تپ به وسیله مدار زمان گذر از صفر استفاده شده است [۱۰ و ۱۱]. در شکل ۲ نمودار بلوکی ادوات الکترونیکی تشکیل دهنده آزمایش ترسیم شده است. علت استفاده از این روش کیفیت جداسازی بهتر در انرژیهای کم نسبت به مدار کسر ثابت می باشد [۱۲]. لازم به ذکر است از جمله روشهای مناسب دیگری که استفاده می شود روش زمان-پرواز می باشد [۲۱، ۵] که به دلیل پهنای زیاد عرض تپها در سیکلوترون کرج، و ایجاد خطای زیاد در زمان گیری این روش استفاده نشده است.

### ۲.۳. هندسه آزمایش

فاصله آشکارساز از هدف در تمام آزمایشها ۳ متر انتخاب شده است. سطح جانبی آشکارساز در معرض تابش نوترون قرار گرفته و اندازه گیریها برای هر انرژی در زاویه های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درجه نسبت به امتداد مسیر باریکه دوترون انجام شده است.

### ۳.۳. روش حذف تابش زمینه

منابع تولید نوترون های زمینه عبارتند از:

جدول ۱. مقدار Q برای کانالهای مختلف واکنشی  $D+{}^9\text{Be}$  [۱].

واکنش	Q(MeV)
${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$	+۴/۴
${}^9\text{Be}(d, \gamma n){}^9\text{B}$	- ۴/۱
${}^9\text{Be}(d, pn){}^8\text{Be}$	- ۲/۲
${}^9\text{Be}(d, p\gamma n){}^8\text{He}$	- ۳/۸
${}^9\text{Be}(d, p){}^8\text{He}$	- ۵/۷
${}^9\text{Be}(d, \gamma \text{He}){}^8\text{Li}$	- ۱/۰

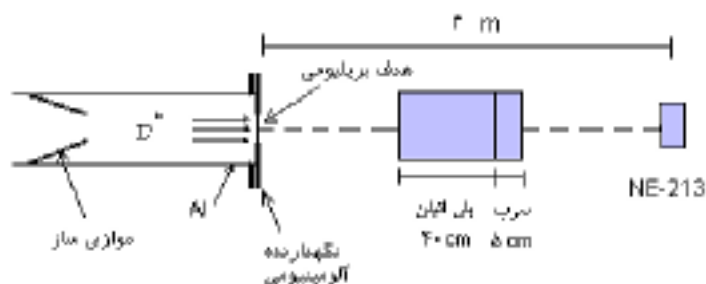
## ۲. مشخصات شتاب دهنده

در انجام این آزمایش از شتابدهنده سیکلوترون مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته ای (NRCAM) سازمان انرژی اتمی ایران استفاده شده است. این شتاب دهنده باریکه های پروتون یا دوترون تولید می کند و می تواند پروتون ها را در محدوده ۱۵ تا ۳۰ میلیون الکترون ولت و دوترون ها را در محدوده ۷ تا ۱۵ میلیون الکترون ولت شتاب دهد. حداکثر جریان باریکه ذرات برای پروتون ها ۵۰۰ میکرو آمپر و برای دوترون ها ۱۵۰ میکروآمپر است و قدرت تفکیک انرژی آن ۲٪ می باشد.

## ۳. روش آزمایش

برای تولید نوترون های سریع از باریکه دوترون در انرژیهای ۷، ۱۰، ۱۳ و ۱۵ میلیون الکترون ولت استفاده شده است. هدف بریلیومی نازک به ضخامت ۰/۲ میلیمتر و قطر ۲۰ میلیمتر انتخاب شد. برای قرار دادن هدف در انتهای خط انتقال باریکه، یک نگهدارنده آلومینیومی به طریقی طراحی و ساخته شد که هدف بریلیومی به صورت پنجره عمل نماید، و امکان خنک کردن هدف توسط جریان هوا یا آب در آن امکان پذیر باشد. میانگین جریان دوترون ها در هر آزمایش ۱۱۰ پیکو آمپر انتخاب شد. زیرا در جریانهای بیشتر و در فاصله ۳ متری آشکارساز از هدف، آشکار ساز اشباع می شود. افزایش این فاصله به سبب شرایط فضای آزمایشگاه ممکن نبود. چون آزمایش در جریان





شکل ۳. جاذب پلی اتیلنی به ضخامت ۴۰ cm که در بین آن ورقه‌های کادمیوم به کار رفته است. جاذب سربی به ضخامت ۵ cm برای حذف اشعه گاما می‌باشد. فاصله بین هدف و آشکارساز ۳ m می‌باشد که جاذب در وسط مسیر قرار می‌گیرد.

و مستقیماً به آشکارساز رسیده اند.

#### ۴.۳. روش بازیافت طیف انرژی نوترون از طیف ارتفاع تپ پروتون‌های پس زده

می‌دانیم که طیف اندازه گیری شده به وسیله آشکارساز NE-213، طیف انرژی هسته‌های پس زده توسط نوترون‌ها است و باید از روی آن طیف انرژی نوترون‌ها را به دست آورد. برای این کار باید معادله انتگرالی زیر را حل کرد:

$$M(E) = \int_{E'} R(E, E') \Phi(E') dE' \quad (1)$$

که در آن  $\Phi(E)dE$ ، طیف چشمه یا تعداد ذراتی که با انرژی بین  $E$  و  $E+dE$  از چشمه گسیل شده اند،  $M(E)dE$ ، طیف اندازه گیری شده یا تعداد ذراتی که با انرژی بین  $E$  و  $E+dE$  اندازه گیری شده اند و  $R(E, E')$  تابع پاسخ آشکارساز یا احتمال اینکه ذره‌ای با انرژی  $E'$  از چشمه گسیل شده و با انرژی بین  $E$  و  $E+dE$  ثبت شود، هستند. انتگرال فوق را انتگرال پیچش می‌نامند و محاسبه  $\Phi$  با داشتن  $M(E)$  و  $R(E, E')$  را عمل بازیافت<sup>۱</sup> یا واپیچش می‌نامند [۳].

برای به دست آوردن ماتریس پاسخ آشکارساز ابتدا به وسیله کُد O5S که به روش مونت کارلو عمل می‌کند [۴] تابع پاسخ آشکارساز را در انرژیهای مختلف به دست می‌آوریم. این کُد تابع پاسخ آشکارساز را از انرژی ۰/۲ تا ۲۰ میلیون الکترون ولت تولید می‌کند. سپس به وسیله کُد RESPMG [۵] از روی توابع پاسخ تولید شده در O5S ماتریس پاسخ آشکارساز،  $R(E, E')$  را به دست می‌آوریم. با اندازه گیری طیف

ارتفاع تپ (پاسخ آشکارساز  $M(E)$ ) و داشتن ماتریس پاسخ می‌توان به روشهای مختلف معادله (۱) را حل کرده و شار چشمه را به دست آورد. کُد FORIST [۶] از جمله کدهایی است که به روش حداقل مربعات شار چشمه را محاسبه می‌کند.

#### ۴. نتایج اندازه گیریها

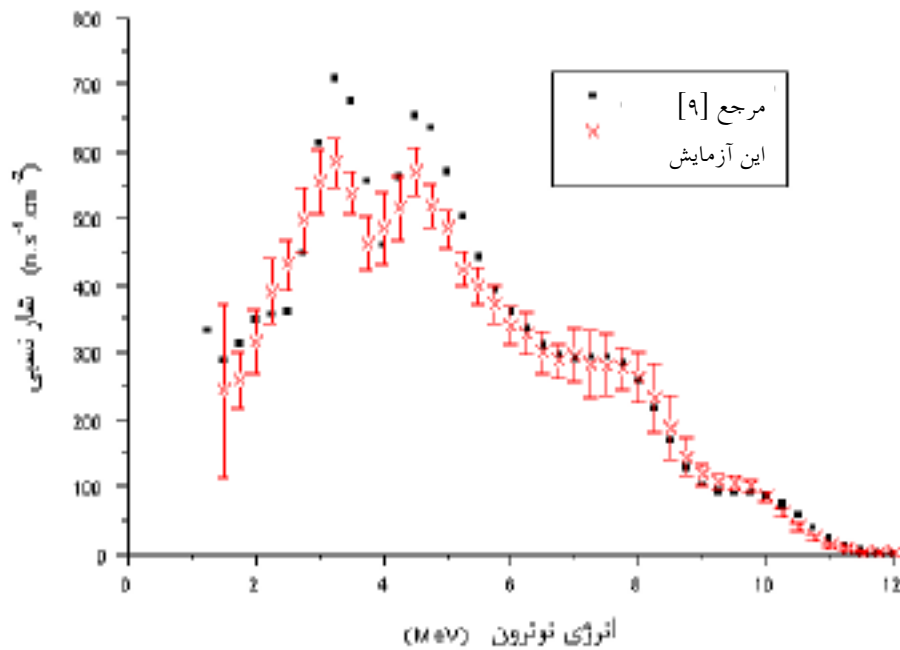
##### ۴.۱. مشخصات طیف نوترون در چشمه D+Be

با توجه به اندازه گیری طیف انرژی نوترون در چشمه D+Be برای انرژیهای مختلف، مشاهده می‌شود طیف این چشمه برای دوترون‌های با انرژی بالاتر از ۸ MeV در صفر درجه دارای سه مشخصه زیر می‌باشد [۲،۱]:

- ۱- یک قله تیز در انرژی ۷ MeV که ناشی از واپاشی تراز برانگیخته ۲/ ۴۳ MeV در  ${}^9\text{Be}$  به حالت پایه  ${}^9\text{Be}$  است. این قله در انرژیهای دو ترون بالاتر از ۵/۵ MeV تولید می‌شود.
- ۲- یک دره در انرژی حدود ۲ MeV که با تغییر در انرژی دوترون عمق و محل آن کمی تغییر می‌کند.
- ۳- یک قله پهن با انرژی در حدود ۴۰٪ از انرژی دو ترون فرودی، که در زاویه‌های بیشتر از صفر ضعیف تر می‌شود. همچنین ای.جی.آلن و همکارانش نشان دادند که توزیع زاویه‌ای نوترون‌ها در برهم کنش دوترون با هسته‌های مختلف مانند  $\text{Be}$ ،  $\text{Al}$ ،  $\text{Cu}$ ،  $\text{Mo}$ ،  $\text{Bi}$  و عناصر دیگر در جهت رو به جلو (نسبت به جریان دوترون‌ها) یک بیشینه دارد [۷].

##### ۴.۲. طیفهای به دست آمده

برای اطمینان از صحت اندازه گیری و خروجی کدها، طیف نوترون چشمه Am-Be که یک چشمه شناخته شده است اندازه



شکل ۴. مقایسه طیف Am-Be به دست آمده در این آزمایش و آزمایش کوهی و همکاران [۹] که هر دو طیف با FORIST بازیافت شده‌اند.

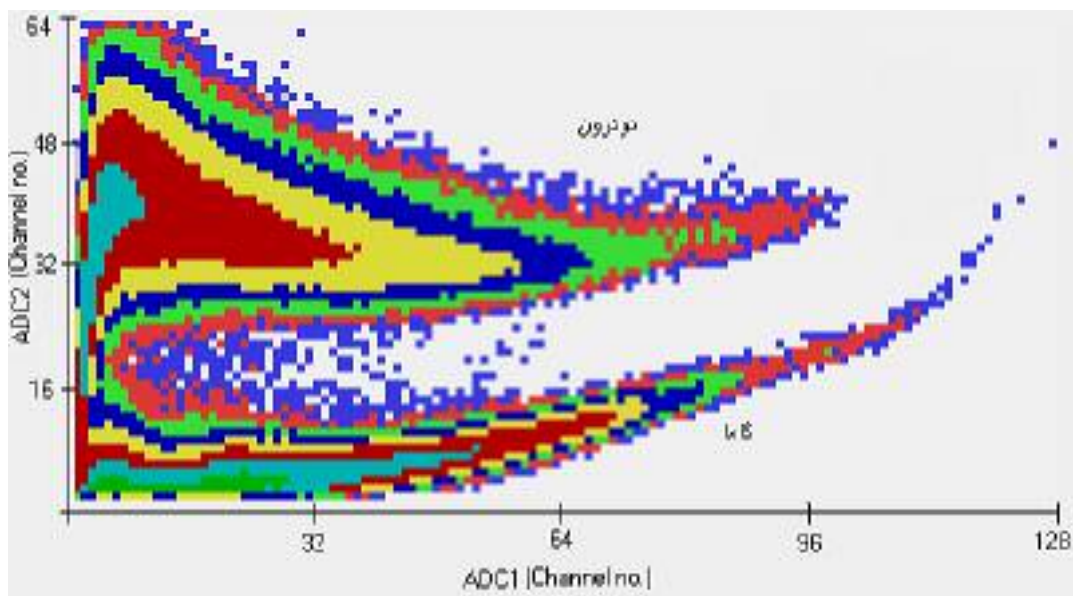
توضیحات ذکر شده در بخش ۴، ۱ برای دوترون‌های با انرژیهای بیش از ۸ MeV صادق است، طیف به دست آمده در انرژی ۷ MeV با نتیجه گزارش شده توسط تی.ان.مسی و همکارانش مقایسه شده است. آزمایش تی.ان.مسی و همکارانش در صفر درجه و با هدف ضخیم بریلیومی انجام شده است [۸]. مشاهده می‌شود مکان دره و قله سازگارند. چون در این اندازه‌گیری از هدف نازک استفاده شده شار نسبی قدری کمتر به دست می‌آید. به علاوه باید به تفاوت شار در صفر درجه و در ۱۰ درجه توجه داشت.

### ۵. نتیجه‌گیری

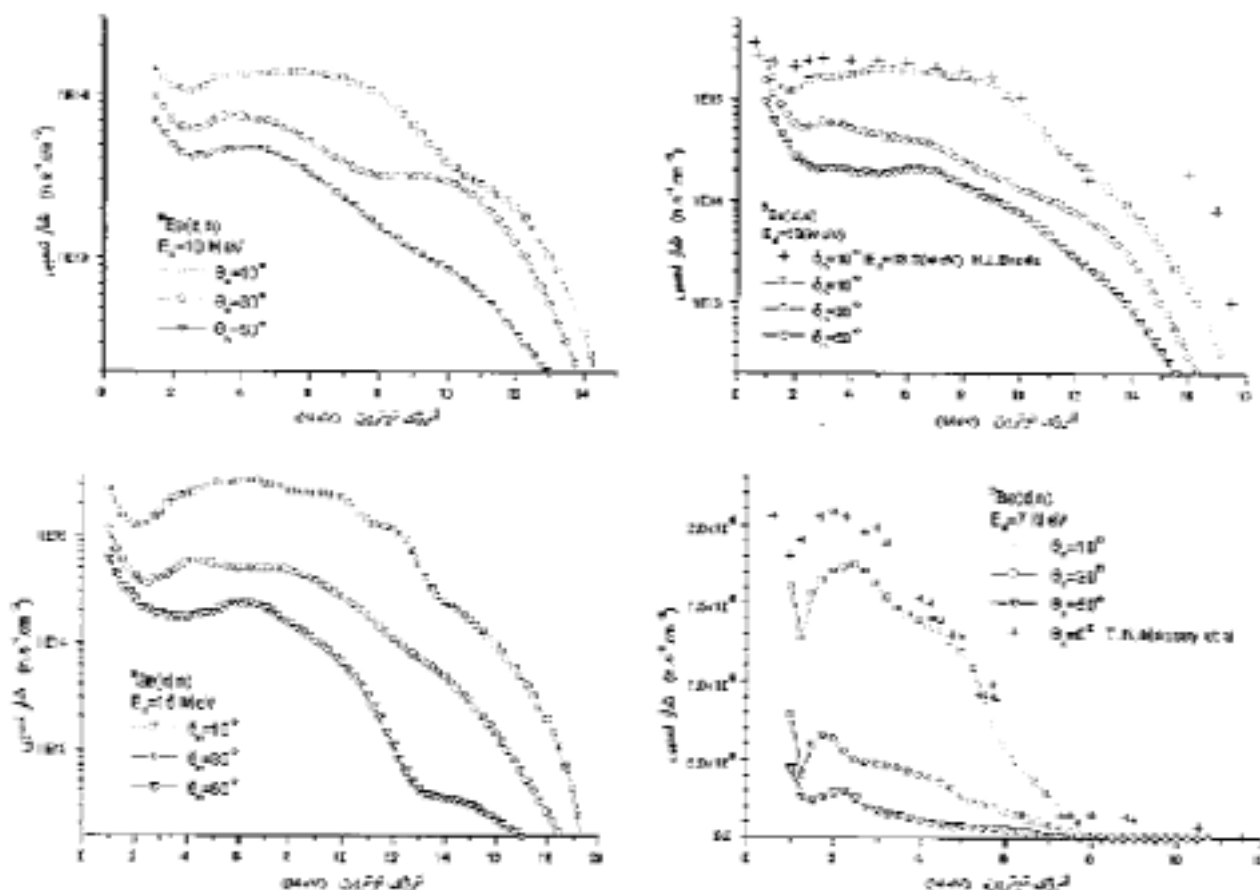
با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود مشخصات طیفهای اندازه‌گیری شده با نتایج آزمایشهای دیگران سازگاری خوبی دارند. در صورت فراهم بودن امکان اندازه‌گیری انرژی با استفاده از روش زمان-پرواز جداسازی نوترون و گاما در انرژیهای کمتر از ۱ MeV ممکن شده و قله موجود در انرژی ۰/۷ میلیون الکترون ولت نیز قابل مشاهده بود. نتیجه آزمایش نشان می‌دهد که آشکارساز، مقسم ولتاژ ساخته شده و کدهای بازیافت طیف انرژی نوترون به خوبی عمل می‌کنند. به این ترتیب ابزار موجود امکان مطالعه و اندازه‌گیریهای

گیری شد. طیف این چشمه همراه با نتیجه کار کوهی فایق و همکارانش [۹] برای مقایسه در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود به جز نواحی کم انرژی طیفها با هم بسیار سازگارند.

تصویر جدا شده نوترون و گاما برای دوترونهای ۱۰ MeV در زاویه ۱۰ درجه در شکل ۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در کانالهای کمتر از ۷ که انرژی آن حدود ۰/۹ MeV است جداسازی انجام نگرفته است. طیفهای بازیابی شده نوترون در انرژیهای ۷، ۱۰، ۱۳ و ۱۵ میلیون الکترون ولت باریکه دوترون، در زاویه‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده اند. طیفی که اچ.جی.برد و همکارانش [۱] در انرژی ۱۳/۳ MeV، در زاویه ۱۰ درجه و با هدف ضخیم بریلیومی گزارش کرده‌اند برای مقایسه آورده شده است. مشاهده می‌شود که مکان دره تقریباً در انرژی ۲ MeV و قله پهن در ۰/۴٪ انرژی دوترون است، ولی چون از روش زمان-پرواز استفاده نشده، در انرژیهای کمتر از ۱ MeV طیف نوترون از گاما در آشکارساز جدا نشده و قله تیز موجود در انرژی ۰/۷ MeV به دست نیامده است. مشاهده اندکی اختلاف در طیف به دست آمده توسط اچ.جی.برد و همکارانش [۱] و این آزمایش، ناشی از استفاده از هدفهای با ضخامت متفاوت است. از آنجا که



شکل ۵. طیف جداسازی شده نوترون و گاما در برهم‌کنش  $D+^9Be$  با دوترون‌های ۱۰ MeV در زاویه ۱۰ درجه.



شکل ۶. طیف انرژی نوترون‌های تولید شده در بمباران هدف نازک بریلیومی به ضخامت ۰/۲ mm با دوترون‌های شتاب داده شده در انرژیهای ۱۰، ۱۳، و ۱۵ میلیون الکترون‌ولت و در زاویه‌های ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درجه.

### قدردانی

در پایان از زحمات و راهنماییهای کارشناسان مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته ای کرج به ویژه بخش سیکلوترون و پژوهشکده فیزیک دانشگاه امام حسین (ع) صمیمانه تشکر می‌کنیم.

نوترونی حاصل از پرتابه دوترون و پروتون با هدفهای مختلف را در سیکلوترون و سایر شتاب دهنده‌های موجود در کشور فراهم می‌کند.

### مراجع

1. H J Brede, G Dietz, K Kudo and D Schlegel Bick Mann, *Radiation Effects* **94** (1986) pp. 129-132.
2. M A Lone and A J Ferguson, *Nuclear Instruments and Methods* **189** (1981) pp. 515-523.
3. G F Knoll, "Radiation Detection and Measurement", Printed by John Wiley & Sons (2000).
4. R E Textor and V V Verbinski, O5S A Monte-Carlo Code for Calculation Pulse Hight Distributions due to Mono Energetic Neutrons incident on Organic Scintillators, Oak Ridge National Lab. ORNL-4160 (1968).
5. W R Burrus et. al., "RESPMG, A Response Matrix Generator Code Package", ORNL-TM-2594(Nov. 1969).
6. R H Johnson, "A User's Manual for COOLC and FORIST", PNE75-107 (1975).
7. A J Allen and J F Nechaj, *Phys. Rev.* **81** (1951) 536.
8. T N Massey, T W Covell, S I Al-Quraishi, D K Jacobs, C E Beient, S M Grimes, W B Howard, J Yanch, D L Smith and B J Micklich, *Fusion Engineering and Design* (1997) 57-63.
9. R Koochi Fayegh, S Green and M Scott, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **460** (2001) pp. 391-400.
10. S Green, R Koochi-Fayegh and M C Scott, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, **431** (1999) pp. 380-382.
11. R Koochi Fayegh, "Neutron spectrum measurements in a beryllium lithium flouride assembly using an NE-213 scintillator", Ph. D. Thesis, Birmingham University (1980).
۱۲. س ز شورشینی "اندازه گیری سطح مقطع کلی عناصر گرافیت، آلومینیوم، آهن، مس و سرب در انرژی حدود ۱۵MeV به روش نوترون زمان پروازی و مقایسه با محاسبات مدل اپتیکی" پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۷۰).