Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 18:05 IRST on Saturday January 9th 2021

یادداشت پژوهشی

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۲، شمارهٔ ۲، اسفند ۱۳۷۸

دز سنجی نوترونهای سریع در دستگاه فعالسازی بدن موجود زنده به کمک نوترون

علی اصغر مولوی و محمد هادی هادیزاده یزدی

گروه فیزیک، دانشکدهٔ علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله: ۷۸/۲/۱۱ دریافت نسخهٔ نهایی: ۷۸/۷/۱۰)

چکیده

بیش از ۴ دهه است که در کشورهای مختلف جهان از روش فعال سازی با نوترون برای اندازه‌گیری ازت و سایر ترکیبات عمده بدن موجودات زنده، استفاده می‌شود. در اینجا ۶کیلوگرم ران گوسفند تازه ذبح شده و فانتوم آن را تحت تابش یک چشمهٔ ۴/۲کوری Am-Be قرار داده‌ایم. میزان ازت نمونه از طیف گاماهای آنی با استفاده از یک آشکارساز سوسوزن (NE213) تعیین شده است. پس از بازیابی طیف نوترونهای سریع در محل فانتوم، دز آنها برآورد شده است. سهم دز نوترونهای با انرژیهای کمتر از 1MeV، $\frac{1}{6}$ سهم نوترونهای با انرژیهای بیش از 1MeV در نظر گرفته شده است، که با طیف چشمهٔ Am-Be سازگار است.

۱. مقدمه

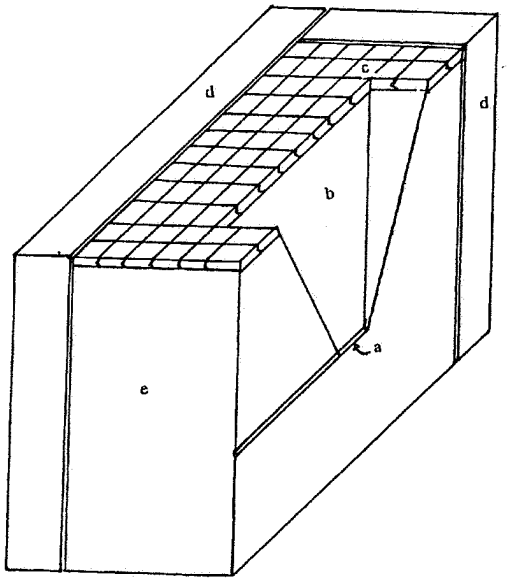
یکی از مسایل عمده در اندازه‌گیری ازت کل بدن یک موجود زنده به روش فعال سازی با نوترون، مسئلهٔ دز سنجی و ارزیابی میزان آسیب ناشی از تابش به بدن است. در اینجا دز ناشی از طیف نوترونهای سریع با استفاده از یک آشکارساز سوسوزن NE213 در محل فانتوم تعیین شده است. روش فعالسازی با نوترون برای اندازه‌گیری عناصر موجود در نمونه سالهاست که در کشورهای مختلف جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱، ۲،و ۳]. این روش مخرب نیست و همچنین سرعت و دقت آن نسبتاً بالاست.

۲. شرح دستگاه تابش نوترون

دستگاهی که برای اندازه‌گیری ازت کل بدن موجودات زنده در گروه فیزیک دانشکدهٔ علوم دانشگاه فردوسی «مشهد» طراحی شده است، عبارت از مکعب مستطیلی از پارافین به حجم ۶۰×۵۰×۵۰ سانتیمتر مکعب است، که در آن یک کاواک به شکل منشور ناقص با ۲۷/۵ سانتیمتر عمق و سطح دهانهٔ ۳۰×۱۵ سانتیمتر مربع برای هدایت نوترونهای سریع به بدن یا فانتوم تعبیه شده است؛ شکل (۱) برشی عرضی از این دستگاه را نشان می‌دهد.

پارافین موجود در مکعب مستطیل در واقع برای موازی سازی و هدایت نوترونهای سریع به طرف بدن یا فانتوم به کار می‌رود، ولی بدیهی است که باعث کند سازی بخشی از

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 18:05 IRST on Saturday January 9th 2021



شکل ۱. برش عرضی دستگاه،
a) محل قرار گرفتن چشمهٔ Am-Be، b) کاواک مخروطی شکل، c) آجرهای سربی، d) محفظه‌های آب و اسیدبوریک و e) پارافین.

نوترونها نیز می‌شود. تختخواب خاصی روی این مکعب مستطیل قرار می‌گیرد که فاصلهٔ سطح بالایی آن، جایی که فانتوم یا مریض روی آن قرار می‌گیرد، از دهانهٔ کاواک ۲ سانتیمتر است. در اطراف سطوح جانبی مکعب مستطیل، محفظه‌های آب و اسید بوریک، برای جذب نوترونهای حرارتی نشت شده از دستگاه، قرار دارند و آشکارساز، روی تخت، کنار فانتوم یا بدن قرار می‌گیرد. استفادهٔ کلنیکی از این دستگاه مستلزم توجه کافی به میزان دز رسیده به بدن به عنوان یک پارامتر بسیار مهم است. در این مورد خاص، دز رسیده به بدن ناشی از چشمهٔ ^{۲۴۱}Am-Be تخمین زده می‌شود.

۳. مسئلهٔ کلی دز سنجی- دز ناشی از نوترون

مساله کلی دز سنجی عبارت از برآورد آهنگ دز در نقطه‌ای با شدت میدان پرتو معین (تعداد ذرات، انرژی و نوع آنها) است. این مساله برای ذرات باردار، گاما، و نوترون متفاوت است. فرض کنید N(E) dE تعداد ذرات با انرژی جنبشی بین E و E+dE بر متر مربع بر ثانیه، و C(E) ضریب تبدیل آهنگ شمارش بر متر مربع به آهنگ دز برای ذرات با انرژی E باشد که یکای آن $\frac{Sv/s}{ذره/m^۲.s}$ است. شخصی که تحت تابش میدان تابشی N(E) است، در واحد زمان دز هم ارز زیر را دریافت می‌کند.

$$DE(Sv/s)=\int_{۰}^{\infty} C(E)\,N(E)\,dE \qquad (۱)$$

معمولاً، توزیعهای گسستهٔ گروههای انرژی میدان تابشی و ضریب تبدیل بدون اطلاع از شکل صریح توابع آنها شناخته شده‌اند. به این ترتیب، کمیتهای زیر در دسترس اند:

تعداد ذرات با انرژی بین $E_{g-۱}$ و E_g بر متر مربع بر ثانیه =

$$N_g = \int_{E_{g-۱}}^{E_g} N(E)\,dE$$

(بازهٔ $E_g - E_{g-۱}$، یک گروه انرژی نامیده می‌شود)

و

$$C_g = \frac{۱}{E_g - E_{g-۱}} \int_{E_{g-۱}}^{E_g} C(E)\,dE$$

بنابراین، معادلهٔ (۱) به صورت زیر در می‌آید

$$DE(Sv/s)=\sum_{g=۱}^{G} C_g N_g \qquad (۲)$$

اکنون می‌توان از معادلهٔ (۲) برای محاسبهٔ دز حاصل از چشمه‌های ذرات باردار، گاما، و نوترون استفاده کرد. دز حاصل از باریکهٔ نوترونهایی که به بدن می‌تابد، ناشی از انتقال انرژی نوترونها به بدن از طریق برخوردهای کشسان و ناکشسان نوترونها با هسته‌ها، و از طریق تابشهای ثانویه‌ای است که به وسیلهٔ رادیوایزوتوپهای تولید شده بعد از جذب نوترونها گسیل می‌شوند.

ساز و کار اصلی انتقال انرژی برای نوترونهای سریع، برخوردهای کشسان است، در صورتی که نوترونهای حرارتی بیشتر از طریق گیراندازی، و غالباً از طریق واکنش $^{۱}H(n,\gamma)^{۲}H$ که منجر به گسیل گاماهای ۲/۲۲۳ MeV می‌شود، جذب بدن می‌شوند. در مورد پراکندگی کشسان نوترونها، هسته‌های

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 18:05 IRST on Saturday January 9th 2021

جدول ۱. ضریبهای تبدیل شار نوترون به آهنگ دز [۵].

انرژی نوترون (MeV)	(Sv/s)/(نوترون/m^2.s)	(rem/h)/(نوترون)/cm^2.s)
$۱/۰\times۱۰^{-۱}$	$۶/۰۳\times۱۰^{-۱۵}$	$۲/۱۷\times۱۰^{-۵}$
$۵/۰\times۱۰^{-۱}$	$۲/۵۷\times۱۰^{-۱۴}$	$۹/۲۶\times۱۰^{-۵}$
۱/۰	$۳/۶۷\times۱۰^{-۱۴}$	$۱/۳۲\times۱۰^{-۴}$
۲/۵	$۳/۴۷\times۱۰^{-۱۴}$	$۱/۲۵\times۱۰^{-۴}$
۵/۰	$۴/۳۳\times۱۰^{-۱۴}$	$۱/۵۶\times۱۰^{-۴}$
۷/۰	$۴/۰۸\times۱۰^{-۱۴}$	$۱/۴۷\times۱۰^{-۴}$
۱۰/۰	$۴/۰۸\times۱۰^{-۱۴}$	$۱/۴۷\times۱۰^{-۴}$

پس‌زده، انرژی شان را در مجاورت محل برهمکنش با نوترون از دست می‌دهند.

برای نوترونهای با انرژی حدود چند keV ، اهمیت برخوردهای کشسان کاهش می‌یابد و واکنش $^{14}N(n, p)^{14}C$ اثرهای بارزی ایجاد می‌کند؛ این واکنش گرمازا با $Q = ۰/۶۲۶$ MeV است و در نتیجه، $E_p \cong \frac{۱۴}{۱۵}Q \cong ۰/۵۸۱$ MeV است. رادیو ایزوتوپ ^{14}C، بتاهای با بیشینهٔ انرژی ۱۵۶/۵ keV گسیل می‌کند، ولی آسیب زیست شناختی، بیشتر ناشی از پروتونهاست نه بتاها.

واکنشهای دیگری که اهمیت ثانویه دارند عبارت اند از: $^{14}N(n, \gamma)^{15}N$ و $^{23}Na(n, \gamma)^{24}Na$. ایزوتوپ ^{24}Na، با نیم عمر ۱۵ ساعت، دو گاما با انرژیهای ۱/۳۷ MeV و ۲/۷۵ MeV گسیل می‌کند. وقتی نوترونهای حرارتی جذب می‌شوند، آسیب، از گاماهایی که بر اثر گیراندازی نوترون تولید می‌شوند به وجود می‌آید. در جدول (۱) ضرایب تبدیل شار نوترون به آهنگ دز جذب شده درج شده است [۵].

۴. اندازه‌گیری و محاسبهٔ طیف انرژی نوترونهای تابیده به فانتوم یا بیمار

برای محاسبهٔ دز هم ارز، طیف انرژی و شار نوترونها باید مشخص باشند. در اینجا برای به دست آوردن طیف انرژی نوترونهای تابیده به فانتوم یا بدن، از آشکارساز سوسوزن آلی NE213 استفاده شده است. سوسوزن آبگون NE213 برای آشکارسازی نوترونها در میدانهای آمیختهٔ نوترون - گاما به کار برده می‌شود، زیرا، اولاً توانایی آن در جداسازی نوترون و گاما بسیار خوب است، ثانیاً، از بازدهی و توان تفکیک انرژی نسبتاً بالایی برخوردار است.

نوترونها در سوسوزن آلی NE213 اغلب از طریق پس زنی پروتون آشکار می‌شوند و پروتوهای گاما اغلب از طریق پراکندگی‌های کامپتون، زیرا ترکیب NE213 به صورت $CH_{۱/۲۱۳}$ می‌باشد [۴]، یعنی نسبت تعداد اتمهای هیدروژن به کربن در هر مولکول ۱/۲۱۳ است و عدد اتمی (Z) متوسط مولکول $\bar{Z} = \frac{۶ + ۱ \times ۱/۲۱۳}{۲/۲۱۳} = ۳/۱۶$ برای هر هسته می‌باشد، که به دلیل کوچک بودن $\bar{Z}$، فرایند غالب، برای پرتوهای گاما، پراکندگی کامپتون است.

جداسازی نوترون - گاما به دو روش امکان‌پذیر است:

الف) روش کسر ثابت[1]

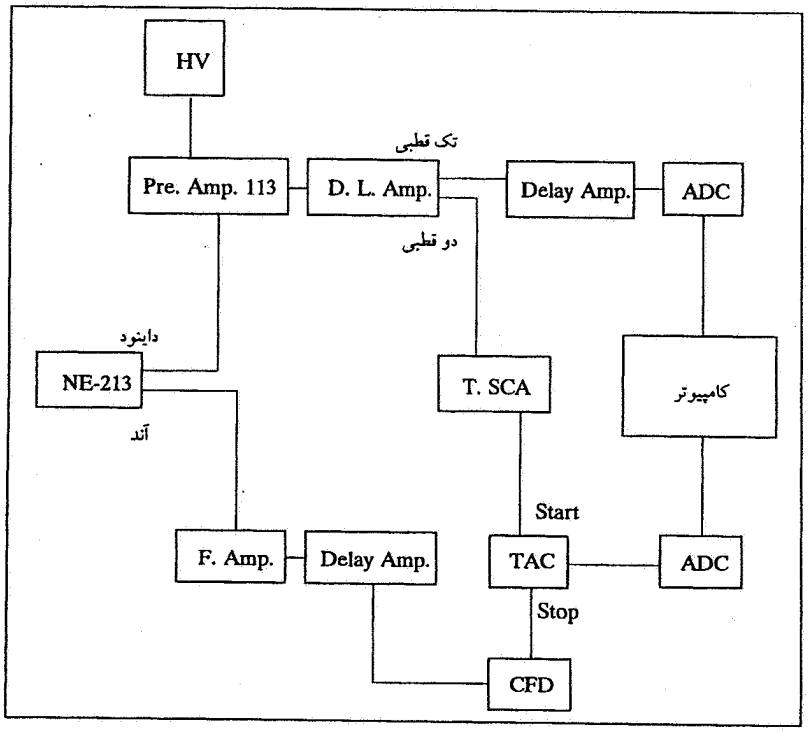
ب) روش زمان گذر از صفر[2]

روشی که ما برای جداسازی استفاده کرده‌ایم روش (ب) است. مدار الکترونیکی به کار رفته در فرایند تفکیک تپهای گاما و

1- Constant Fraction Method

2- Zero Crossing Method

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 18:05 IRST on Saturday January 9th 2021



شکل ۲. مدار جداسازی نوترون - گاما.

۱.۴ مدرج سازی آشکارساز NE213 و طیف سنجی نوترونهای سریع با آن

نوترون در شکل (۲) نشان داده شده است.

مهمترین مساله در استفاده از NE213 به عنوان طیف سنج نوترونهای سریع، مدرج سازی آن است. برای این منظور لازم است، تابع پاسخ طیف سنج مورد مطالعه قرار گیرد. تابع پاسخ یک دستگاه در حقیقت ارتباط دهندهٔ بین ورودیها و خروجیهای آن دستگاه است.

آشکارسازی نوترون با پس زنی پروتون بر پایهٔ برخورد نوترون با پروتون و آشکارسازی متعاقب پروتون در حال حرکت است. چون نوترون و پروتون دارای جرمهای تقریباً یکسانی هستند، نوترون می‌تواند در یک برخورد تمام انرژی خود را به پروتون منتقل کند، ولی انرژی پروتون پس زده می‌تواند هر مقداری بین صفر تا انرژی نوترون باشد. برای انرژیهای نوترون تا ۱۴MeV، برخورد (n-p) در دستگاه مرکز جرم همسانگرد است [۴و۵]، در نتیجه، احتمال یکسانی وجود دارد که پروتون در دستگاه آزمایشگاهی هر انرژی ای بین صفر تا E_n را دارا باشد.

اما آنچه که MCA جمع‌آوری می‌کند، طیف ارتفاع تپ پروتونهاست، که باید اول به طیف انرژی پروتونها و سپس با مشتق‌گیری به طیف انرژی نوترونها تبدیل شود.

می‌دانیم که دامنهٔ تپهای خروجی از تکثیر کنندهٔ فوتونی متناسب با نور خروجی از سوسوزن است، ولی، نور خروجی از سوسوزن متناسب با انرژی ذخیره شدهٔ پروتون در آشکارساز نیست؛ رابطهٔ تحلیلی بین نور خروجی H و انرژی پروتون E_p به صورت زیر است [۶]،

$$\begin{cases} H = ۰/۱۵[E_p\,(MeV)]^{۱/۵۲} & E_p \le ۶MeV \\ H = ۰/۵۷۶ \times E_p - ۱/۱۷۷ & E_p > Mev \end{cases} \qquad (۳)$$

با مشتق‌گیری از معادلات (۳) داریم،

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 18:05 IRST on Saturday January 9th 2021

جدول ۲. داده‌های لبهٔ کامپتون گامای ^{22}Na

کانال قله	۸۷٫۵٪ کانال قله	۵۰٪ کانال قله	۱۲٫۵٪ کانال قله
۵۱	۵۲/۲۲	۵۵/۷۹	۶۱/۲۰
شمارش ۴۲۰	۳۶۷/۵	۲۱۰	۵۲/۵

$$\frac{dH}{dE}=\begin{cases}0/228E_p^{0/52}=0/436H^{0/342} & E_p\le 6\ MeV\\ 0/576 & E_p>6\ MeV\end{cases} \quad (4)$$

و شکل توزیع ارتفاع تپ به صورت زیر به دست می‌آید

$$\frac{dN}{dH}=\frac{dN/dE}{dH/dE}=\begin{cases}\dfrac{K}{0/228E_p^{0/52}}=K'H^{-0/342} & E_p<6\ MeV\\ \dfrac{K''}{0/576}=K''' & E_p>6\ MeV\end{cases} \quad (5)$$

که در آن، K، K'، K'' و K''' ضرایب ثابت اند. در تمام موارد داریم

$$\int\frac{dN}{dH}dH=\int\frac{dN}{dE_p}dE_p=\int\frac{dN}{d(PH)}d(PH).$$

برای تبدیل طیف ارتفاع تپ به طیف انرژی پروتون باید عملیات زیر را انجام داد:

۱- جمع آوری طیف گاماهای ۱/۲۷۴۵ MeV چشمهٔ ^{22}Na، با آشکارساز NE213 و تعیین محل کانال لبهٔ کامپتون که متناظر با انرژی ۱/۰۶۲ MeV است، و این کانال معادل با یک واحد نوری (Lu) است.

۲- استفاده از روابط یکای نوری و انرژی پروتون، برای مدرج سازی طیف ارتفاع تپ برحسب انرژی پروتون. معادلات زیر رابطهٔ یکای نوری و انرژی پروتون را برای آشکار ساز NE213 مورد نظر نشان می‌دهند [۶]،

$$\begin{aligned}Lu&=0/15E_p^{1/52} & E_p\le 6\ MeV\\ Lu&=0/576E_p-1/177 & E_p>6\ MeV\end{aligned} \quad (6)$$

۳- با اعمال روابط (۴) بر طیف ارتفاع تپ مدرج شده برحسب E_p، طیف مدرج شدهٔ انرژی پروتون به دست می‌آید،

$$\frac{dN}{dE_p}=\frac{dN}{dH}\cdot\frac{dH}{dE_p}=\begin{cases}\dfrac{dN}{dH}\times 0/228E_p^{0/52} & E_p\le 6\ MeV\\ \dfrac{dN}{dH}\times 0/576 & E_p>6\ MeV\end{cases} \quad (7)$$

زیرا می‌دانیم که نور خروجی از تکثیر کنندهٔ فوتونی متناسب با ارتفاع تپ (PH) است؛ بنابراین dN/dH متناسب با dN/dPH است.

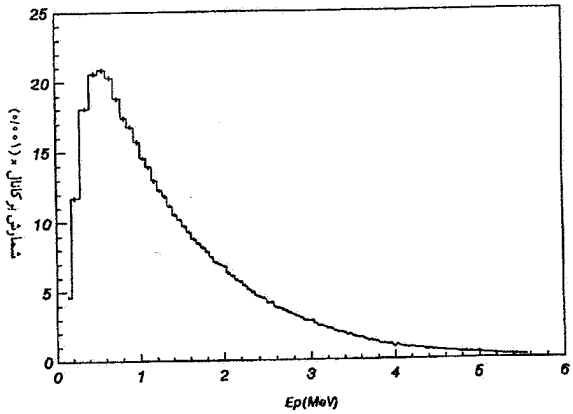
۲.۴ نتایج تجربی

طیف ^{22}Na را برای مدت زمان ۵۰۰۰s جمع آوری کردیم، و محل کانال و میزان شمارش را در سه ارتفاع ۸۷/۵٪، ۵۰٪ و ۱۲/۵٪ قلهٔ پراکندگی لبهٔ کامپتون مطابق با جدول (۲) محاسبه کردیم.

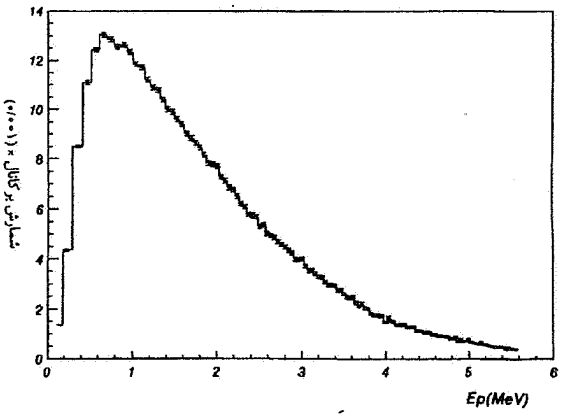
محل تقاطع خط برازش داده شده در این سه نقطه با محور کانال، محل لبهٔ کامپتون اختیار شد. [نسبت دادن این کانال به لبهٔ کامپتون یک نوع قرار داد می‌باشد.] از برون یابی خطی نقاط جدول (۲)، محل لبهٔ کامپتون، کانال ۶۲/۴۷ به دست می‌آید که معادل با یک واحد نوری است.

سه مرحلهٔ مربوط به تبدیل طیف ارتفاع تپ به طیف انرژی پروتون را برروی طیف جمع آوری شده توسط NE213 در زمان زندهٔ ۵۰۰۰s در قرارگاه فانتوم اعمال کردیم. شکل (۳) نمودار طیف جمع آوری شدهٔ ارتفاع تپ مدرج شده برحسب انرژی پروتون را نشان می‌دهد. نمودار شکل (۴)، مربوط به طیف انرژی پروتون است.

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 18:05 IRST on Saturday January 9th 2021



شکل ۳. طیف ارتفاع تپ (مدرج شده برحسب انرژی پروتون).



شکل ۴. طیف انرژی پروتون.

۳.۴ بازیابی مشتقی طیف انرژی نوترون از طیف انرژی پروتون

همانطور که قبلاً ذکر شد، برای انرژیهای تا ۱۴MeV، برخورد (n-p) در دستگاه مرکز جرم، همسانگرد است. در نتیجه، احتمال یکسانی وجود دارد که پروتون در دستگاه آزمایشگاهی هر انرژی ای بین صفر و E_n داشته باشد. یعنی اگر $P(E)dE$ احتمال آن باشد که انرژی پروتون پس از برخورد بین E و E+dE باشد داریم،

$$P(E)\,dE = \frac{dE}{E_n}$$

آنچه برای ناظر مهم است توزیع ارتفاع تپ پروتون است نه خود P(E). ارتباط بین ارتفاع تپ و طیف نوترون به صورت زیر به‌دست می‌آید.

طیف انرژی نوترون = شمار نوترونهای با انرژی بین E_n و $\phi(E_n)dE_n = E_n + dE_n$

طیف انرژی پروتون = تعداد پروتونهای تولید شده (توسط نوترون) با انرژی بین E_p و $N(E_p)dE_p = E_p + dE_p$

تابع جواب آشکارساز = احتمال آنکه یک پروتون با انرژی E_p در بازهٔ انرژی E و E + dE ثبت شود = $R(E, E_p)dE_p$

طیف اندازه‌گیری شده = تعداد پروتونهای اندازه‌گیری شده با انرژی بین E و $M(E)dE = E + dE$

طیف اندازه‌گیری شدهٔ M(E) dE، توزیع ارتفاع تپ در مقیاس انرژی است. تابع پاسخ $R(E, E_p)$ قدرت تفکیک انرژی متناهی آشکارساز و ارتباط بین انرژی ذخیره شده در آشکارساز و ارتفاع تپ را در بردارد. با فرض همسانگرد بودن پراکندگی در دستگاه مرکز جرم، طیف انرژی پروتون به صورت

$$N(E_p)dE_p = \int_0^{E_{max}} N_H T\sigma(E_n)\phi(E_n) \times dE_n \frac{dE_p}{E_n} H(E_n - E_p) \qquad (۸)$$

خواهد بود، که در آن N_H، تعداد اتمهای هیدروژن که در معرض تابش باریکه نوترون قرار گرفته‌اند و T مدت زمان اندازه‌گیری پروتونهای پس زده است. تابع $H(E_n-E_p)$ یک تابع پله‌ای به صورت زیر است:

$$H(E_n - E_p) = \begin{cases} ۱ & E_n > E_p \\ ۰ & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

در این صورت طیف انرژی با رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$M(E)\,dE = \int_0^{E_{max}} dE\, R(E, E_p)\, N(E_p)\, dE_p \qquad (۹)$$

که در آن، E_{max}، حد بالای انرژی در طیف انرژی نوترون است.

با جایگذاری معادلهٔ (۸) در معادلهٔ (۹) داریم،

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 18:05 IRST on Saturday January 9th 2021

$$M(E)\,dE = \int_0^{E_{max}} dE\, R(E, E_p) \times \int_0^{E_{max}} N_H T\sigma(E_n)\phi(E_n)H(E_n - E_p)\frac{dE_n dE_p}{E_n}$$

$$= \int_0^{E_{max}} dE_n \phi(E_n)\left[\int_0^{E_{max}} N_H T \frac{\sigma(E_n)}{E_n} R(E, E_p) H(E_n - E_p) dE_p\right]$$

بنابراین:

$$M(E)dE = \int_0^{E_{max}} dE_n \phi(E_n) K(E, E_n) dE_n \qquad (۱۰)$$

که در آن

$$K(E, E_n) = \int_0^{E_{max}} N_H T \frac{\sigma(E_n)}{E_n} R(E, E_p) \times H(E_n - E_p) dE_p \qquad (۱۱)$$

معادلهٔ (۱۱) تابع پاسخ "مرکب" طیف سنج پروتون - پس زنی را می‌دهد. هدف از طیف سنجی نوترون، یافتن طیف انرژی $\phi(E)$ موجود در معادلهٔ (۱۰) است.

۴.۴ بازیابی مشتقی طیفهای پروتون پس زنی

اگر $R(E, E_n) = \delta(E, E_p)$ باشد، در آن صورت تابع پاسخ مرکب طیف سنج پروتون پس زنی، با استفاده از معادلهٔ (۱۱)، به صورت زیر در می‌آید،

$$K(E, E_n) = N_H T \frac{\sigma(E_n)}{E_n},$$

و معادلهٔ (۱۰) شکل زیر را خواهد یافت

$$M(E)\,dE = N_H T \int_E^{E_{max}} dE_n \frac{\sigma(E_n)}{E_n} \phi(E_n), \qquad (۱۲)$$

که در آن، حد پایین انتگرال را برابر E گرفته‌ایم چرا که فقط نوترونهای با انرژی $E_n > E$ می‌توانند در M(E) شرکت کنند.

معادلهٔ (۱۲) را می‌توان با مشتق‌گیری حل کرد و به نتیجهٔ زیر رسید

$$\phi(E) = \frac{E}{N_H T\sigma(E)}\left[\frac{dM(E)}{dE}\right]. \qquad (۱۳)$$

مشتق موجود در معادلهٔ (۱۳) به روشهای عددی صورت می‌گیرد زیرا این خود طیف M(E) نیست که اندازه‌گیری می‌شود بلکه "هم ارز گروه بندی شدهٔ" آن یعنی

$$\int_{E_i}^{E_{i+1}} M(E)dE = M_i \qquad (۱۴)$$

است که در آن M_i شمارش در کانال i ام طیف سنج است. معمولاً به هر M_i انرژی متناظر با نقطهٔ میانی کانال را نسبت می‌دهند و یک چند جمله‌ای مرتبهٔ M را با روش حداقل مربعات بر آن نقطه و N نقطهٔ ماقبل و مابعد آن برازش می‌دهند (این یک برازش مرتبهٔ M ام (۱ + ۲N) نقطه‌ای است). مشتق این چند جمله‌ای در نقطهٔ میانی را به عنوان $(dM(E)/dE)_i$ در نظر می‌گیرند. عیب این روش آن است که طیف بازیافته را کمی "سخت" می‌کند. در روش مشتقی بهتر، نخست طیف واقعی $\phi(E)$ را هموار می‌سازند تا یک طیف واقعی "هموار شده" $\phi_s(E)$ به صورت

$$\phi_s(E) = \int_0^{\infty} G(E, E')\,\phi(E')dE' \qquad (۱۵)$$

به دست آید، که در آن $G(E, E')$ یک تابع هموارساز و بهنجار است. با جایگذاری معادلهٔ (۱۳) در معادلهٔ (۱۵)، داریم

$$\phi_s(E) = \int_0^{\infty} G(E, E')\frac{E'}{N_H T\sigma(E')}\frac{dM(E')}{dE'}dE'$$

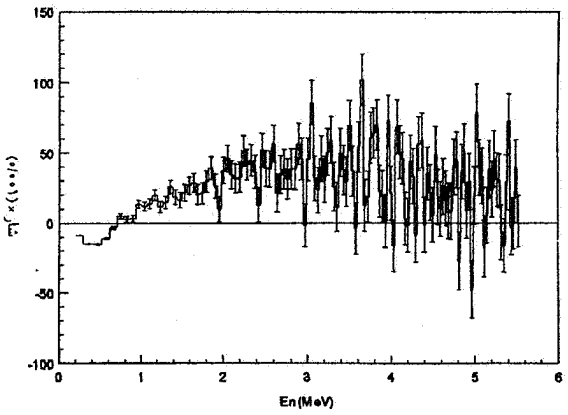
$$= \frac{G(E, E')}{N_H T\sigma(E')} E'M(E')\Big|_0^{\infty}$$

$$- \frac{1}{N_H T}\int_0^{\infty} \frac{d[G(E, E')E'/\sigma(E')]}{dE'} M(E')dE'$$

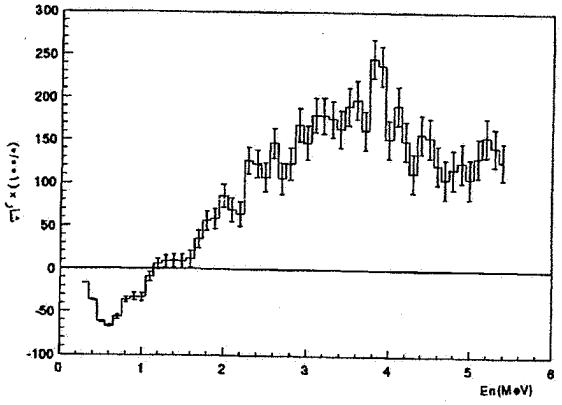
Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 18:05 IRST on Saturday January 9th 2021

جدول ۳. شار گروه‌های انرژی نوترون در محل فانتوم.

گروه [با زهٔ انرژی نوترونها] MeV	شار [نوترون /m^2.s]	ضریب تبدیل شار نوترون به آهنگ دز (Sv/s)/(نوترون / m^2.s)
۰/۳–۰/۵	–	$۲/۵۷\times۱۰^{-۱۴}$
۰/۵–۱	–	$۳/۶۷\times۱۰^{-۱۴}$
۱–۲/۵	۷۶۶۹۸۵	$۳/۴۷\times۱۰^{-۱۴}$
۲/۵–۵	۳۹۲۹۱۹۹	$۴/۳۳\times۱۰^{-۱۴}$
۵<	۷۵۶۶۴۶	$۴/۰۸\times۱۰^{-۱۴}$



شکل ۵. طیف سخت شار نوترون.



شکل ۶. طیف هموار شار نوترون.

$$\cong \sum_{i=1}^{NC} \frac{1}{N_H T}\left[\frac{G(E, E_{i+1})E_{i+1}}{\sigma(E_{i+1})} - \frac{G(E, E_i)E_i}{\sigma(E_i)}\right] M_i \qquad (۱۶)$$

که M_i از معادلهٔ (۱۴) به دست می‌آید و NC، تعداد کانالهاست و فرض بر این است که کمیت $E'G(E, E')/\sigma(E')$ در دو حد انتگرال‌گیری معادلهٔ (۱۵) به سمت صفر میل می‌کند. نتیجهٔ حاصل از (۱۶) با یک تابع هموار ساز گاوسی، فاقد "سختی طیف" است. از آنجا که منظور ما از طیف سنجی، به دست آوردن دز هم ارز جذب شدهٔ بدن، ناشی از تابش باریکهٔ نوترون، است لذا از هموار سازی طیف با تابع $G(E, E_i)$ صرف نظر کردیم؛ و طیف شار نوترون را با تبدیل نمودار پله‌ای طیف انرژی پروتون به دست آمده از طیف ارتفاع تپ، [که شامل ۱۲۷ بازهٔ غیر همسان است] به یک نمودار پله‌ای با بازه‌های یکسان انرژی که هر بازهٔ انرژی مساوی ۰/۱ MeV است؛ هموار کردیم. شکل (۵)، نمودار طیف سخت شار نوترون، و شکل (۶)، نمودار طیف هموار شدهٔ آن را نشان می‌دهد.

در تجزیه و تحلیل طیف سخت شار نوترون، توجه به نکات زیر حایز اهمیت است: اولاً، شار منفی در قسمتهای ابتدایی طیف، به خاطر این است که طیف سنجی نوترونهای با انرژی کمتر از ۱MeV با آشکارساز NE213 امکان‌پذیر نیست، ثانیاً ناحیهٔ انتهایی طیف بسیار متغیر (سخت) بوده و در قسمتهایی منفی شده است، که این به علت پایین بودن آمار شمارش در قسمتهای انتهایی طیف ارتفاع تپ می‌باشد. همچنین طیف

Downloaded from ijpr-old.iut.ac.ir at 18:05 IRST on Saturday January 9th 2021

هموار شدهٔ شار نوترون نشان می‌دهد که الف) در مقایسه با طیف چشمه، (^{۲۴۱}Am-Be)، محل قله‌ها با هم مطابقت دارند، ب) بعضی از نوترونهای با انرژی بالا که از چشمه خارج شده‌اند در اثر پراکندگی مقداری انرژی از دست داده‌اند و به گروههای با انرژی کمتر منتقل شده‌اند. ج) به علت بالا بودن بهرهٔ تقویت، شکل شار نوترونها را برای انرژیهای بالاتر از ۵/۶MeV از دست داده‌ایم.

سطح زیر منحنی نمودار شکل (۶)، شار نوترونها در گروههای مختلف انرژی را به دست می‌دهد که به همراه ضریب تبدیل شار به آهنگ دز هم ارز برای هر گروه، در جدول (۳) درج شده است [۵]. در نتیجه، داریم،

$$DE = ۲/۲۷۶۲ \times ۱۰^{-۷} \pm ۸/۲۳۹۹ \times ۱۰^{-۹} Sv/s = ۸۲۰ \pm ۳۰ \mu Sv/h$$

دز سنجی پرتوهای گاما با دز سنج PDR4 انجام شده است، و آهنگ دز مربوط به نوترونهای کند را با آشکار ساز ^{۳}He که با مانیتور نوترون NM2B مدرج شده بود، اندازه‌گیری کردیم. در محل فانتوم، روی دهانهٔ کاواک، آهنگ این دز ۱۴۲μSv/h و در بالای فانتوم، یعنی آهنگ دز نوترونهای نشتی از سطح بالایی فانتوم پر از آب و اوره حدود ۱۸μSv/h، و در کنار دستگاه، در ارتفاعی مطابق با قرارگاه چشمهٔ نوترون، ۴/۵μSv/h بود.

طیف سنجی نوترونهای سریع با آشکار ساز NE213 انجام گرفت، ولی اطلاعی از طیف نوترونهای با انرژی کمتر از ۱MeV به دست نیامد. لذا دز مربوط به این گروه از نوترونها را باید از طریقی دیگر تعیین و محاسبه کرد. از آنجا که اندازه‌گیری عملی این طیف ممکن نبود، با توجه به طیف انرژی نوترونهای چشمهٔ ^{۲۴۱}Am-^{۹}Be، دز مربوط به گروه انرژی بین حرارتی تا ۱MeV را $\frac{۱}{۶}$ دز نوترونهای سریع اندازه‌گیری شده در نظر گرفتیم، هرچند که این تخمینی دست بالاست. بنابراین آهنگ دز کل جذب شده، جمع کل آهنگ دزها می‌باشد یعنی

$$DE = DE_{\gamma} + DE_{n_{\text{حرارتی}}} + DE_{n_{\text{سریع}}}$$
$$= ۲۵ + ۱۴۲ + ۸۲۰ + \frac{۱}{۶} \times ۸۲۰$$
$$= ۱۱۲۳ \mu Sv/h$$

در دز سنجیهای انجام شده، برای اندازه‌گیری عناصر بدن به روش فعالسازی نوترونی، بدوا و همکارانش [۲] دز جذب شده در هر بار تابش دهی را با استفاده از مانیتور Studsvik و فیلم بج، کمتر از ۰/۳mSv گزارش کرده‌اند، و در کارهای دیگران برای اندازه‌گیری ازت با روشهای گامای آنی یا تأخیری، بازهٔ ۰/۲mSv تا ۱mSv گزارش شده است [۲ و ۳].

اگر دز جذب شده در هر بار تابش دهی را تا ۰/۳mSv مجاز بدانیم، زمان تابش دهی ۱۰۰۰s به دست می‌آید که مدت زمان کافی برای نمایان شدن ناحیهٔ ازت می‌باشد و قابل مقایسه با زمان تابش دهی در کارهای بدوا که ۲۰۰۰sec بوده است می‌باشد [۲].

لازم به یادآوری است که به منظور ایمنی بیشتر، اخیراً ضرایب کیفیت QF برای نوترونهای حرارتی و سریع به ترتیب ۵ و ۲۰ پیشنهاد شده‌اند [۷].

مراجع

1. J Anderson, S B Osborn, RWS Tomlinson, et al., *Neutron Activation Analysis in man in vivo: A new technique in medical investigation.* pp 1201-1205, Lancet Dec 5, (1964).
2. A H Beddoe, H Zuidmeer and G L Hill, *Phys. Med. Biol.* **29**, pp 371-383, 1984.
3. D R Chettle and J H Fremlin, *Nucl. Phys. Med. Biol.* **29** pp 1011, (1984).
4. F Glenn Knoll, *Radiation Detection and Measurment,* Jon Wiley & Sons, (1989).
۵. سولفانیدیس اندازه‌گیری و آشکارسازی"تابشهای هسته‌ای" ترجمهٔ دکتر رکوهی فائق، و دکتر م هادی زاده یزدی، چاپ اول بهمن ص ۷۱۳-۷۱۴ (۱۳۷۱).
۶. رکوهی فائق و م هادی زاده یزدی، مجلهٔ فیزیک سال ۹ شمارهٔ ۳ و ۴ (۱۳۷۰).
7. W D Ehmann, and D E, Vance, *Radiochemistry and Nuclear Methods of Analysis,* Jon Wiley & Sons, (1991).