

اندازه‌گیری و محاسبه شار نوترونی‌های پر انرژی در مجموعه‌هایی از آلومینیوم، گرافیت، آب و پارافین

رضا ایزدی نجف‌آبادی^۱، رحیم کوهی فائق^۱ و حسین آفریده^۲

۱. دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد

۲. سازمان انرژی اتمی ایران

(دریافت مقاله: ۸۱/۹/۱۰ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۱/۱۲/۱۰)

چکیده

در بخش تجربی این بررسی، طیف انرژی نوترونی‌های سریع پس از عبور از بلوکهای بزرگ گرافیت، آلومینیوم، آب و پارافین، هر کدام به حجم حدود یک متر مکعب اندازه‌گیری شده است. نوترونی‌های مورد استفاده از واکنش (p,n) با فرود پروتونهای ۲۵ و ۳۰ میلیون الکترون ولت، شتاب داده شده به وسیله سیکلوترون مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای کرج، بر هدف لیتیومی تولید می‌شود. اندازه‌گیری با استفاده از آشکارساز ۷۶×۷۶ میلیمتری سوسون $NE-۲۱۳$ ، در دو نقطه خارج بلوکها، یکی در راستای تابش باریکه پروتون و دیگری عمود بر راستای آن انجام گرفته است. در تحلیل نتایج این آزمایشها از کدهای RESPMG و SCINFUL به ترتیب برای تولید ماتریس پاسخ و تابع پاسخ آشکارساز در انرژیهای مختلف استفاده شده است. سپس با کد FORIST عمل بازیافت طیف نوترون از طیف ارتفاع تپ پروتون انجام گرفته است. در بررسی نظری موضوع، طیف انرژی نوترونها را به روش مونت کارلو، با به کارگیری کد محاسباتی MCNP4C، برای حالت‌های مختلف محاسبه کرده‌ایم. نهایتاً نتایج به دست آمده از دو روش مقایسه شده اند.

واژه‌های کلیدی: مجموعه، آزمایشهای انتگرالی، طیف نوترون

۱. مقدمه

در چند دهه اخیر آزمایشهای فراوانی در زمینه اندازه‌گیری و تخمین داده‌های هسته‌ای صورت گرفته است. حاصل این آزمایشها، گستره بسیار وسیعی از داده‌های هسته‌ای است که امروزه به صورت مجموعه‌های با ارزش و مهم، تحت عنوان کتابخانه داده‌ها، در اختیار ما می‌باشد. در میان روشهای تجربی، به خصوص در زمینه فیزیک نوترون، آزمایشهای انتگرالی جایگاه ویژه‌ای دارند.

یک آزمایش انتگرالی از این دست روشی است که طی آن فرآیندهای مختلف برهمکنش نوترون در یک مجموعه بزرگ تک‌عنصری و یا مرکب مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. بزرگی مجموعه نسبت به پویش آزاد متوسط نوترون سنجیده می‌شود، به گونه‌ای که نوترون بتواند قبل از ترک مجموعه یا

جذب در آن، به طور متوسط چند برهمکنش با محیط انجام دهد [۱].

به دلیل محدودیت امکانات، اندازه‌گیری داده‌های مربوط به نوترون، برای انرژیهای بالا (بیش از ۲۰ میلیون الکترون ولت) کمتر صورت گرفته است. به همین دلیل داده‌های مربوط به تمام ایزوتوپهای شناخته شده، در انرژیهای بالا در کتابخانه‌های موجود وجود ندارد و یا اگر هم وجود داشته باشد معمولاً با خطای زیاد همراه است [۲].

در انجام این پروژه که به منظور برآورد صحت و احتمالاً اصلاح داده‌های موجود صورت گرفته است، شار تابع انرژی نوترونی‌های حاصل از برهمکنش پروتونهای ۲۵ و ۳۰ میلیون الکترون ولت با هدف لیتیوم در چهار ماده مختلف آلومینیوم، آب خالص، گرافیت طبیعی، و پارافین خشک، هر کدام به حجم

مدار زمان‌گذر از صفر استفاده شده است. شکل ۲ آرایش این مدار را که از مجموعه‌ای ادوات الکترونیکی ویژه برپا شده است، نشان می‌دهد. شکل ۳ نمونه‌ای از طیف جداسازی شده نوترون و گاما مربوط به گرافیت، که روی صفحه تصویر خروجی دو پارامتری قابل مشاهده است، و شکل ۴ طیف ارتفاع تپ پروتون پس زده که از برش طیف نوترون-گاما به دست آمده است را نشان می‌دهد.

۲.۲. روش حذف تابش زمینه

نوترونها و پرتوهای گامایی که وارد آشکارساز می‌شوند، به جز از چشمه‌ی اصلی ${}^6\text{Li}(p,n){}^3\text{He}$ ، از منابع دیگری که آنها را زمینه می‌نامیم به وجود می‌آیند. مهمترین این منابع عبارتند از:

۱. برخورد پرتوهای باریکه، به دیوار لوله آلومینیومی خط انتقال، نگهدارنده آلومینیومی هدف، و موازی‌ساز آلومینیومی. وجود این قطعات و انجام برهمکنش $Al(p,n)Si$ عامل مهمی در ایجاد زمینه است.

۲. عبور بخش عمده‌ای از پرتوهای از هدف لیتیوم و نگهدارنده آن و برخورد به مجموعه مورد آزمایش. این پرتوهای، بسته به نوع عناصر مجموعه و از جمله ظرف حاوی آب، انواع واکنشهای تولید نوترون و گاما را سبب شوند.

۳. پراکنده شدن نوترونها از دیوار، کف و سقف آزمایشگاه و سایر وسایل موجود در محیط.

برای اندازه‌گیری شمارشهای زمینه مربوط به موارد ۱ و ۲، به این ترتیب عمل شد که برای هر دستگاه خاص و به ازای یک انرژی معین دو بار آزمایش تکرار گردید. یک بار بدون قرار دادن پولک لیتیوم و بار دوم با نصب آن در محل مربوطه. در اندازه‌گیری اول، کل نوترونها و پرتوهای گامای رسیده به آشکارساز مربوط به منابع زمینه‌اند و به این ترتیب فقط طیف زمینه جمع‌آوری می‌شود. در اندازه‌گیری دوم مجموع طیف چشمه اصلی $Li+p$ و زمینه به دست می‌آید. اگر این دو طیف، با استفاده از جریان روی هدف و شمارش BF_3 بهنجار شده و از هم کم شوند، طیف باقی‌مانده حاصل از نوترونها و پرتوهای گامایی است که توسط Li تولید شده و پس از فرآیندهای مختلف به آشکارساز رسیده‌اند.

۲.۳. روش بازیافت طیف نوترون از طیف پرتوهای پس‌زده

اصولاً در طیف‌سنجی نوترون به‌وسیله سوسوزن $NE-213$

حدود $1m^3$ ، اندازه‌گیری شده است. دلایل انتخاب این مواد، علاوه بر اهمیت و کاربرد آنها در صنعت هسته‌ای، امکان اقتصادی تهیه آنها، شرایط محیطی و استحکام فیزیکی محل آزمایش بوده است.

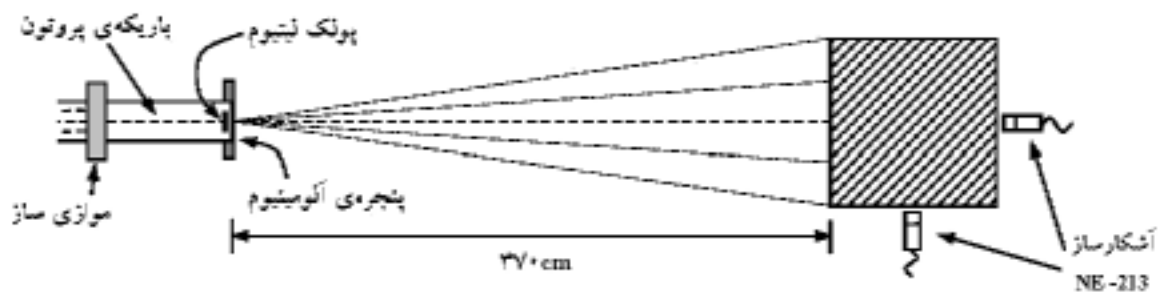
آشکارسازی و نهایتاً اندازه‌گیری شار نوترون، توسط سوسوزن $NE-213$ به ابعاد $76mm \times 76mm$ انجام گرفت. چون علاوه بر نوترون، به دلیل برهم‌کنشهای پی‌درپی و بعضاً آبشاری نوترون در محیط، پرتوهای گامای زیادی ایجاد می‌شود و این آشکارساز نسبت به پرتو گاما هم حساس است، باید آنها را از هم تفکیک نمود. شکل تپ حاصل از نوترون و پرتو گاما در این سوسوزن متفاوت است به طوری که تپهای حاصل از پرتو گاما سریعتر صفر می‌شوند. بنابراین با استفاده از روش تبعیض شکل تپ ($P.S.D$)، تپهای نوترونها از تپهای گاماها جداسازی شده‌اند.

۲. روش آزمایش

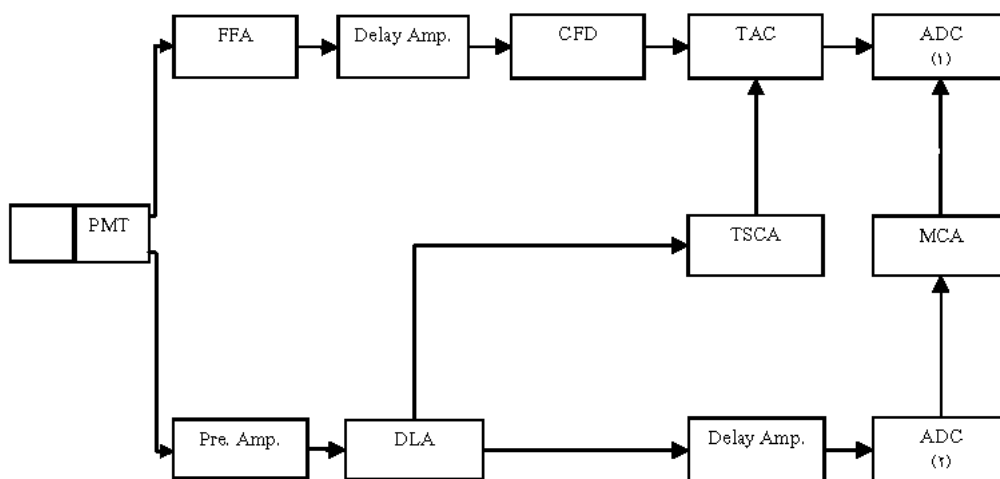
شکل ۱ نمای کلی پیکربندی آزمایش را نشان می‌دهد. باریکه پروتون با انرژی ۲۵ یا ۳۰ میلیون الکترون‌ولت بر پولک لیتیوم به ضخامت 0.2 میلی‌متر و قطر 20 میلی‌متر فرود می‌آید. پولک توسط یک نگهدارنده آلومینیومی به ضخامت تقریبی $1/5$ میلی‌متر نگهداری می‌شود. نوترونها حاصل از برهمکنش پروتون با لیتیوم در بازه زاویه‌ای $2\theta_m$ به مجموعه مورد نظر، که در فاصله 370 سانتی‌متری از چشمه نوترون قرار دارد، برخورد می‌کنند. آشکارساز $NE-213$ ، یک بار در پشت مجموعه و در راستای باریکه پروتون و بار دوم در مرکز وجه جانبی آن، نوترونها را خروجی را اندازه‌گیری می‌کند. این آشکارساز قبلاً از نظر انرژی کالیبره شده است که گزارش نحوه کار در جای دیگری آمده است [۳]. هر آزمایش، به ازای یک انرژی معین و در یک وضعیت استقرار آشکارساز، دو بار انجام گرفته است. یک بار با هدف لیتیوم و بار دوم بدون وجود لیتیوم و به منظور تعیین زمینه. علاوه بر این از یک شمارنده 2 متری BF_3 به عنوان شمارنده مرجع تعداد نسبی نوترونها چشمه استفاده شده است.

۲.۱. جداسازی طیف نوترون از گاما

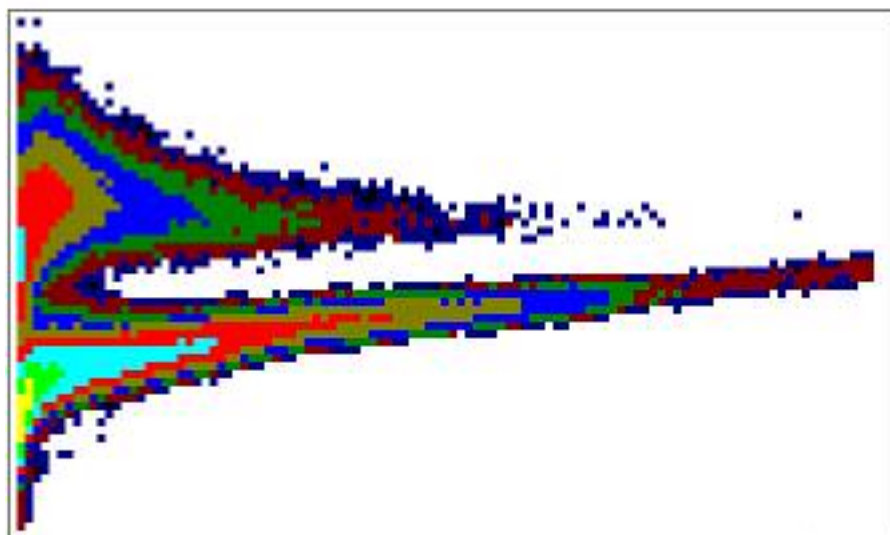
روشهای مختلفی برای جداسازی طیف نوترون از گاما وجود دارد [۴]. در این آزمایش از روش تفکیک شکل تپ به وسیله



شکل ۱. هندسه آزمایش.



شکل ۲. مدار آزمایش جداسازی نوترون-گاما به روش زمان گذر از صفر.



شکل ۳. نمونه طیف جدا شده نوترون-گاما، قابل مشاهده روی صفحه تصویر خروجی دو پارامتری. شاخه بالا مربوط به نوترون (پروتونهای پس‌زده) و شاخه پایین مربوط به گاما است.

کرده و نتایج ترابرد ذره را به صورت تابعی از انرژی ارائه می‌دهد.

برای استفاده از کد MCNP لازم است یک فایل ورودی حاوی اطلاعات مورد نیاز، از جمله هندسه سیستم، نوع عناصر و مواد مجموعه‌ها، مکان و ویژگیهای چشمه، خواسته‌های مورد نظر و غیره، که بعداً توسط کد خوانده می‌شود، برای برنامه تنظیم گردد [۸]. مهمترین مورد، چشمه نوترون است که همان‌طور که قبلاً اشاره شد طی واکنش $Li(p,n)$ تولید می‌گردد. آن دو پارامتر دخالت دارد. یکی انرژی پروتونها و دیگری جهت گسیل نوترونها نسبت به باریکه پروتون فرودی است [۹]. شکل ۵ سه طیف مختلف حاصل از پروتونهای $25 MeV$ ، در زاویه‌های ۱۰، ۳۰، و ۵۰ درجه را نشان می‌دهد [۳]. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود طیفها، ضمن شباهت کلی، هم از نظر انرژی قله و هم از نظر فراوانی گسیل (سطح زیر طیفها) با یکدیگر تفاوت دارند. البته طیفهایی که ما لازم داریم مربوط به زاویه‌هایی غیر از این سه طیف است. با توجه به هندسه آزمایش نوترونیایی که از چشمه به مجموعه مورد تحقیق برخورد می‌کنند در بازه زاویه‌ای محدودی قرار دارند. مثلاً برای مجموعه آلومینیوم، نوترونها در زاویه بین $\theta=0$ تا بیشینه $\theta_m=15/12$ درجه به مجموعه برخورد می‌کنند (مجموعه آلومینیومی مورد آزمایش به شکل مکعب مستطیلی است که مقطع آن در شکل ۱ مستطیلی به ابعاد 1×2 متر است. سایر مجموعه‌ها تقریباً مکعبی شکل‌اند). بنابراین برای شبیه‌سازی واقعیت باید چند طیف در چند زاویه همین محدوده به ورودی برنامه بدهیم. در این مورد طیفهای نوترون در زاویه‌های ۰، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، و ۱۶ درجه را به کمک شکل ۴ و با روش برونیابی خطی محاسبه و مورد استفاده قرار دادیم.

۴. اقدامات تجربی و انجام محاسبه

برای انجام آزمایش و داده‌برداری، مجموعه مورد آزمایش را هر بار به‌گونه‌ای مستقر نمودیم که امتداد باریکه پروتون از وسط یکی از وجوه مکعبی و یا مکعب مستطیلی نمونه و عمود بر آن عبور کند. پس از بستن مدار و آماده‌سازی کامل دستگاه آزمایش، طیف نوترون-گاما را برای مدت زنده ۱۵۰۰ ثانیه جمع‌آوری نمودیم. در مجموع ۳۲ اندازه‌گیری روی مجموعه‌های چهارگانه انجام گرفت. در تمام اندازه‌گیریها جریان باریکه

چیزی که اندازه‌گیری می‌شود، طیف ارتفاع تپ حاصل از ذرات باردار ایجاد شده در آشکارساز است. روشن است که هدف اصلی به دست آوردن طیف انرژی نوترونهای رسیده به آشکارساز می‌باشد. رابطه بین این دو طیف با معادله انتگرالی زیر داده می‌شود [۴]:

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

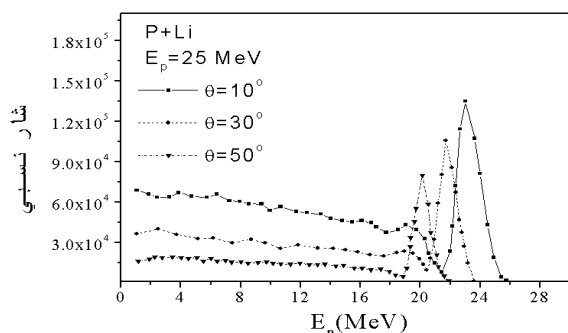
که در آن $M(L)dL$ طیف اندازه‌گیری شده، و یا تعداد تپهایی است که با ارتفاع بین L و $L+dL$ ثبت شده‌اند. $R(L, E')dL$ تابع پاسخ آشکارساز یا احتمال اینکه نوترونی با انرژی E' به آشکارساز وارد شده و تپی با ارتفاع بین L و $L+dL$ ثبت گردد می‌باشد. $\varphi(E')dE'$ نیز طیف نوترون، یا تعداد نوترونی است که با انرژی بین E و $E+dE$ وارد آشکارساز شده‌اند.

انتگرال بالا را انتگرال پیچش می‌نامند و محاسبه φ از روی $M(L)$ و $R(L, E')$ بازبایی یا واپیچش نامیده می‌شود [۴].

برای به دست آوردن ماتریس پاسخ آشکارساز ابتدا با به‌کارگیری کد SCINFUL که به روش مونت کارلو کار می‌کند [۵]، تابع پاسخ آشکارساز را در انرژیهای مختلف به دست می‌آوریم. این کد تابع پاسخ آشکارساز را از انرژی ۰/۱ تا ۸۰ میلیون الکترون‌ولت تولید می‌کند. آنگاه به وسیله کد RESPMG [۶] از روی تابعهای پاسخ تولید شده در SCINFUL، ماتریس پاسخ آشکارساز، یا $R(L, E')$ را به دست می‌آوریم. با اندازه‌گیری طیف تپهای آشکارساز، $M(L)$ و داشتن ماتریس پاسخ می‌توان به روشهای مختلف معادله (۱) را حل کرده و طیف نوترون را به دست آورد. کد FORIST از جمله کدهایی است که به روش حداقل مربعات، شار نوترون را محاسبه می‌کند [۷].

۳. محاسبه شار نوترون

با توجه به سرشت کاتوره‌ای برهمکنشهای هسته‌ای، شبیه‌سازی مونت کارلو برای محاسبات نوترونی بسیار واقعی و دور از کلیه تقریبها و خطاهای روشهای تحلیلی است. در این روش تمام فرایندها مطابق آنچه در عالم واقع رخ می‌دهد دنبال می‌شوند و احتمال هر رویداد، با توجه به مقادیر تجربی سطح مقطعها، تعیین می‌گردد. در این پروژه، شبیه‌سازی مونت کارلو با استفاده از کد محاسباتی MCNP انجام گرفته است [۸]. این کد ترابرد نوترون، فوتون و الکترون را، در هر نوع هندسه سه بعدی، دنبال



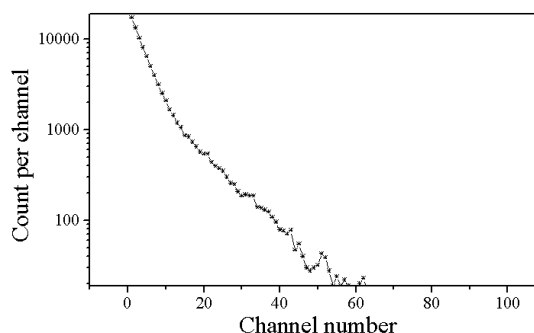
شکل ۵. طیفهای اندازه‌گیری شده نوترون حاصل از واکنش $Li(p,n) Be$ [۳].

انجام گرفت. در هر محاسبه، برای دستیابی به دقت بیشتر، تاریخچه یک میلیارد نوترون دنبال شد به طوری که علیرغم استفاده از کامپیوتر با سرعت بالا (۱۶۰۰MHz) هر مورد حدود ۲۵ ساعت زمان‌گیری داشت. چهار نمونه از این محاسبه‌ها در شکل‌های ۶ تا ۱۳ نشان داده شده است.

۵. مقایسه و تحلیل نتایج

چنانچه در شکل‌های ۶ تا ۱۳ مشاهده می‌شود، طیفهای به‌دست آمده، اعم از اندازه‌گیری و محاسبه در انرژیهای بالا، دارای قله‌ای می‌باشند که تقریباً منطبق بر قله چشمه‌ها است. این قله‌ها ناشی از کسر کوچکی از نوترونها است که به دلیل انرژی بالا، طول مجموعه را بدون هیچ برهمکنشی طی کرده و به آشکارساز رسیده‌اند. نسبت قسمت کم‌انرژی طیفها به ارتفاع قله آنها، در کلیه این طیفها، در مقایسه با همین نسبت در طیفهای چشمه (شکل ۵) به‌طور چشم‌گیری بالا رفته است. پهنای قله‌ی چشمه هم در این طیفها بهتر شده است. هردوی این پدیده‌ها حاصل برهمکنش نوترونها در محیط است که مورد انتظار هم می‌باشد.

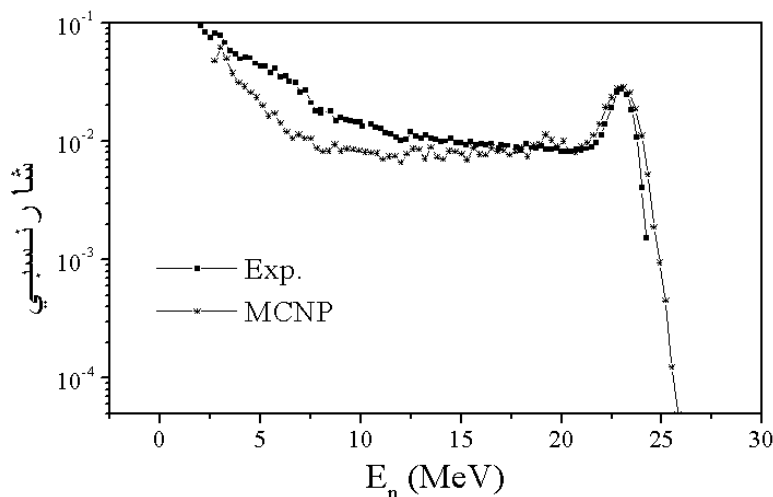
از لحاظ مقایسه طیفهای تجربی و محاسبه‌ای، دو نکته شاخص وجود دارد. اول اینکه در نواحی کم‌انرژی و میانی، طیفهای تجربی بالاتر از طیفهای محاسبه‌ای قرار دارند که دلیل آن را می‌توان عمدتاً به پراکندگی نوترونها از سقف، کف و دیوارهای اتاق آزمایش و دیگر ابزارهایی که در حد نسبتاً زیاد در محیط وجود دارند دانست. همچنین بخشی از این اختلاف، در انرژیهای خیلی پائین، می‌تواند به نحوه برش طیف نوترون از طیفهای جداشده نوترون-گاما مربوط باشد که مطابق شکل ۳



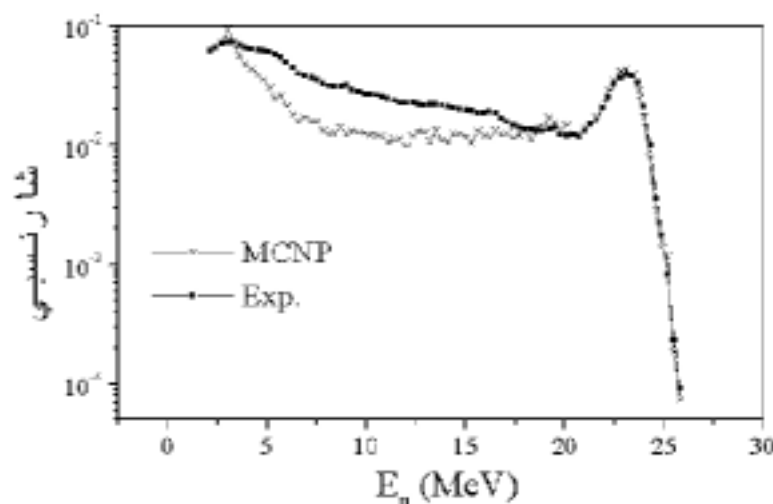
شکل ۴. طیف ارتفاع تپ پروتون پس‌زده که از برش طیف نوترون-گامای شکل ۳ به دست آمده است.

پروتون روی ۱/۰ میکرو آمپر تنظیم گردید که البته، به دلیل عدم دقت کافی سیکلوترون در تنظیم جریانهای پایین، با نوساناتی همراه بود. جریان مانده روی هدف لیتیوم نیز به دلیل واگرایی باریکه و مشکل متمرکز کردن آن روی هدف، در آزمایشهای مختلف متفاوت بود، به طوری که از ۲/۵ نانو آمپر تا ۱۹/۶ نانو آمپر، از یک آزمایش به آزمایش دیگر متغیر بود. مقدار عددی این جریان به همراه شمارش BF_3 را برای نرمالیزه کردن اندازه‌گیریها و حذف زمینه مورد استفاده قرار دادیم. به این ترتیب که هر بار، در شرایط ثابت دستگاه‌ها و هندسه آزمایش، فقط با گذاشتن و برداشتن پولک لیتیوم، دو طیف نوترون-گاما را جمع‌آوری نمودیم. با برش طیفهای متعلق به نوترون و بازیافت و بهنجار کردن آنها، طیف ارتفاع تپ زمینه را از طیف کل کم کردیم و نتیجه نهایی را که همان طیف حاصل از برهمکنش $P+Li$ است به‌دست آوردیم. شکل‌های ۶ تا ۱۳ چند نمونه طیفهای اندازه‌گیری شده مربوط به مجموعه‌های آلومینیوم، پارافین، گرافیت، و آب را که اولی با انرژی ۲۵ و بقیه با انرژی ۳۰ مگا الکترون ولت انجام گرفته، و با طیفهای محاسبه شده مقایسه شده‌اند، نشان می‌دهد. شکل ۱۴ نیز نمونه‌ای از طیفهای اندازه‌گیری شده نوترون، حاصل از فرود پروتونهای ۲۵ مگا الکترون ولت روی هدف Al و $Al+Li$ و تنها را نشان می‌دهد. در این شکل همچنین طیف $p+Li$ که از تفاضل دو طیف فوق، پس از بهنجار کردن، به‌دست آمده است دیده می‌شود.

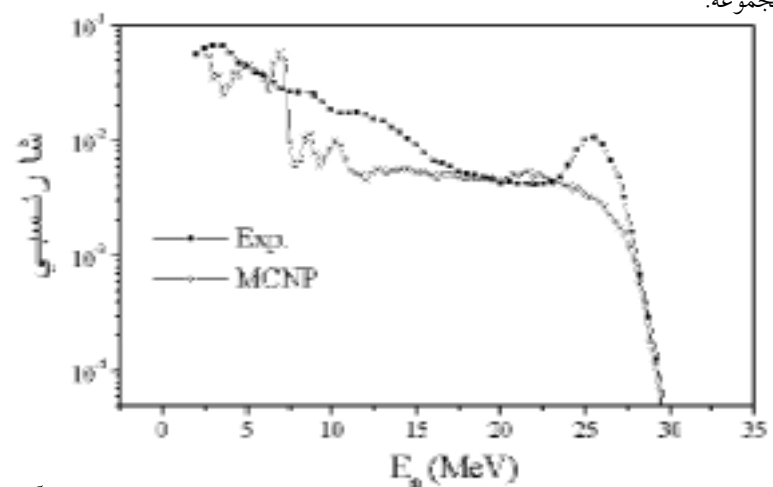
برای انجام محاسبه، فایل‌های ورودی لازم را براساس دستورالعمل مربوطه تنظیم کرده و هر بار خروجی را به‌دست آوردیم. جمعاً تعداد ۱۶ محاسبه مطابق با اندازه‌گیریهای تجربی



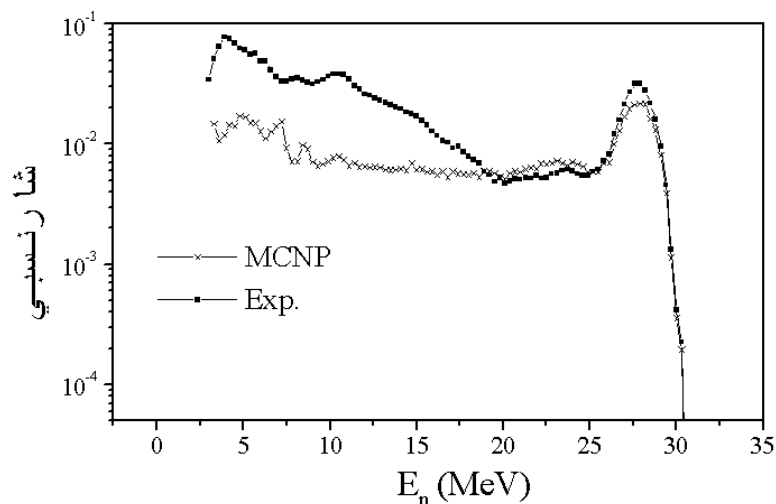
شکل ۶. نمودار مقایسه‌ای طیفهای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در مجموعه آلومینیوم. انرژی پروتون 25 MeV و آشکارساز در مرکز وجه جانبی مجموعه.



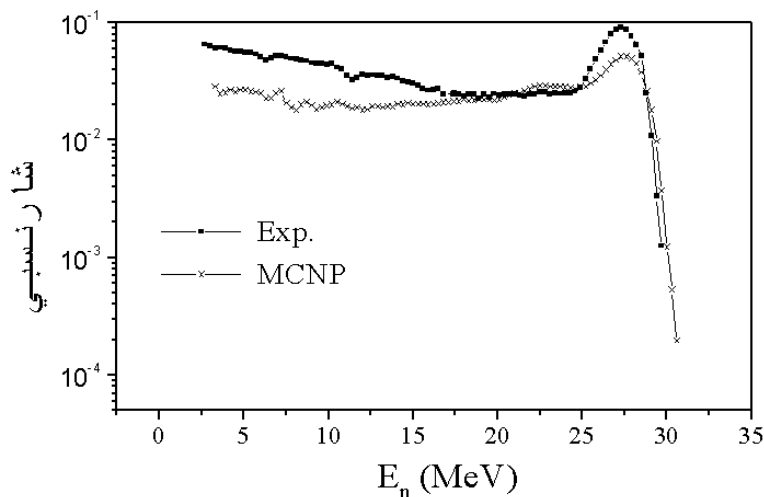
شکل ۷. نمودار مقایسه‌ای طیفهای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در مجموعه آلومینیوم. انرژی پروتون 25 eV و آشکارساز در مرکز وجه مقابل مجموعه.



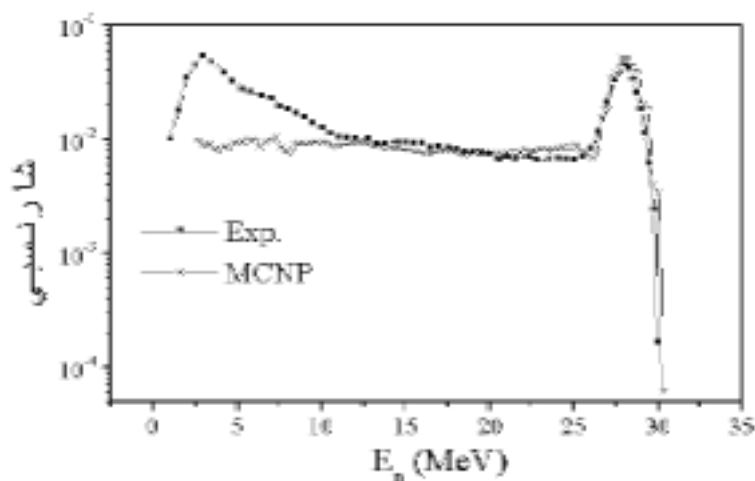
شکل ۸. نمودار مقایسه‌ای طیفهای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در مجموعه گرافیت. انرژی پروتون 30 eV و آشکارساز در مرکز وجه مقابل مجموعه.



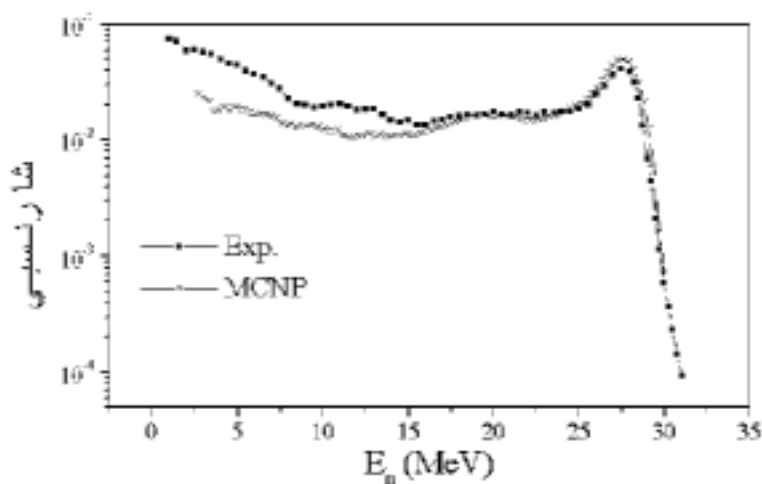
شکل ۹. نمودار مقایسه‌ای طیفهای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در مجموعه گرافیت. انرژی پروتون 30 MeV و آشکارساز در مرکز وجه جانبی مجموعه.



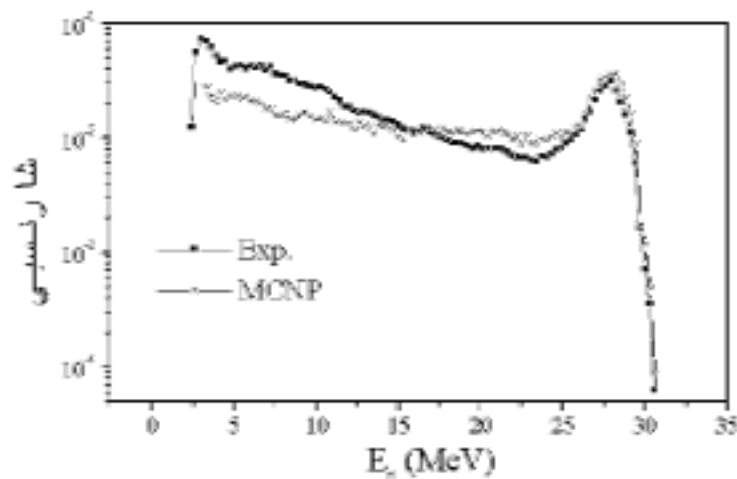
شکل ۱۰. نمودار مقایسه‌ای طیفهای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در مجموعه پارافین. انرژی پروتون 30 MeV و آشکارساز در مرکز وجه مقابل مجموعه.



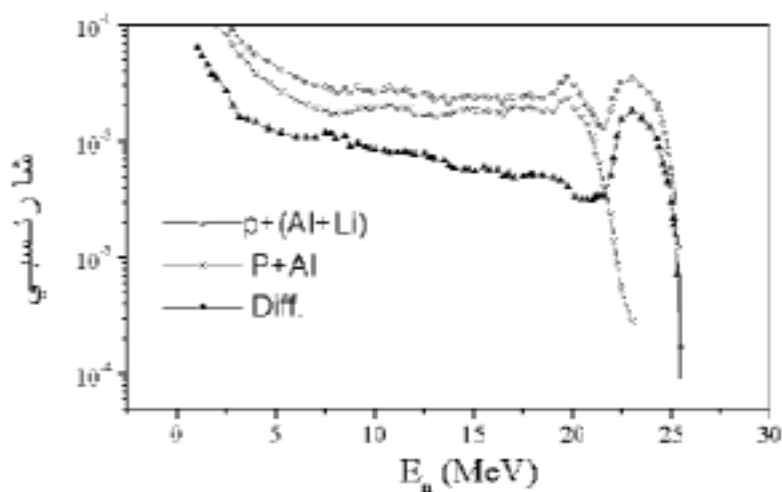
شکل ۱۱. نمودار مقایسه‌ای طیفهای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در مجموعه پارافین. انرژی پروتون 30 MeV و آشکارساز در مرکز وجه جانبی مجموعه.



شکل ۱۲. نمودار مقایسه‌ای طیفهای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در مجموعه آب. انرژی پروتون 30 MeV و آشکارساز در مرکز وجه مقابل مجموعه.



شکل ۱۳. نمودار مقایسه‌ای طیفهای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در مجموعه آب. انرژی پروتون 30 MeV و آشکارساز در مرکز وجه جانبی مجموعه.



شکل ۱۴. طیفهای اندازه‌گیری شده نوترون، حاصل از ورود پروتونهای 25 MeV روی هدف Al و $Al+Li$ منحنی $Diff$ طیف $p+Li$ است

جذب نوترون در کربن در حوالی انرژی 26 MeV قله‌ای وجود دارد که باعث جذب نوترونهای پرانرژی می‌شود. با توجه به اینکه اندازه‌گیریهای انجام شده در این پروژه وجود قله را تأیید نمی‌کند، احتمال این هست که در سطح مقطع مربوط به این انرژی خطا وجود داشته باشد. البته برای سطح مقطعها به تحلیل حساسیت نتایج آزمایشها و متعاقباً تکرار آزمایشها و محاسبه نیاز است که امید می‌رود در آینده انجام پذیرد.

در کانالهای پایین MCA همپوشانی دارند. ناخالصیهای احتمالی مجموعه‌ها نیز در اختلاف دو طیف مؤثرند اما این مقدار نمی‌تواند از چند درصد بیشتر باشد. نکته دوم از مقایسه طیفها، مربوط به مجموعه گرافیت است که در طیف محاسبه شده آن قله قابل توجهی در انرژیهای بالا دیده نمی‌شود، در حالی که در اندازه‌گیری این قله نمایان است. با مراجعه به فایل سطح مقطعها در کد MCNP مشاهده می‌شود که در سطح مقطع

مراجع

1. M C Scott "The Role of Integral Experiments in Neutron Data Assessment", University of Birmingham (1977).
2. P F Rose And C D Dunford "ENDF-6 Formats Manual", IAEA (1990).
3. F Abbasi Davani et al, *Radiation Measurements*, **37** (2003) 237-245.
4. G F Knoll, "Radiation Detection and Measurement", Printed by John Wiley & Sons (2000).
5. J K Dickens, "SCINFUL: a Monte Carlo Based Computer Program to Determine a Scintillator Full Energy Response to Neutron Detection" *ORNL-6462* (Mar. 1988).
6. W R Burrus et al, "RESPMG, A Response Matrix Generator Code Package", *ORNL-TM-2594* (Nov. 1969).
7. R H Johnson, B W Wehring and J J Dorning, *Nucl. Sci. Eng.* **73** (1980) 79.
8. RSICC Computer Code Collection MCNP 4C (April 2000).
9. S Cierjacks "Neutron Sources for Basic Physics and Application", Oxford (1983).