



مولد رویداد نوترینوی کم انرژی بر پایه‌ی فلوکا

حسن اختری قمی^۱، محمدجواد صفری^۲، فریدون عباسی دوانی^{۳*}

۱. پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

۲. دانشکده‌ی مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران - ایران

۳. گروه کاربرد پرتوها، دانشکده‌ی مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران - ایران

چکیده: آشکارسازی پادنوترینوهای کم انرژی، کاربردهایی در علوم و مهندسی دارد. اخیراً تیم فلوکا مدل موسوم به پینات (PEANUT) را توسعه داده است که توانایی شبیه‌سازی برهم‌کنش‌های همه‌ی طعم‌های نوترینو از آستانه تا TeV را دارد. در این مقاله فلوکا با تأکید بر برهم‌کنش‌های پادنوترینوی الکترون کم انرژی (یعنی پادنوترینوهای حاصل از رآکتور) به عنوان یک مولد رویداد نوترینو معرفی می‌شود. نتیجه‌های به دست آمده اعتبار و توانایی کاربرد کد را نشان می‌دهد. نکته‌ی قابل توجه این است که فلوکا توانایی رضایت‌بخشی در ترابرد بسیاری دیگر از انواع ذره‌ها در هندسه‌های پیچیده‌تر را دارد که این، فلوکا را به ابزاری قدرتمند برای هدف‌های مهندسی نوترینو تبدیل می‌کند.

کلیدواژه‌ها: مولد رویداد نوترینو، نوترینوی کم انرژی، فلوکا

Low Energy Neutrino Generator on the Basis of FLUKA

H. Akhtari^{1,2}, M.J. Safari², F. Abbasi Davani^{3*}

1. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran-Iran

2. Nuclear Engineering Faculty, Amirkabir University, P.O.Box: 15875-4413, Tehran - Iran

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

Abstract: Detection of low-energy anti-neutrino has certain applications in science and technology. Recently, the FLUKA collaboration, so-called the PEANUT model, has been developed which is capable of simulating all neutrino flavors from the threshold up to TeV. Here, the FLUKA code will be demonstrated as a neutrino event generator, upon emphasizing the interaction of low-energy electron anti-neutrino (i.e., those coming from nuclear reactors). The results which are reported in this paper show the applicability and capability of the code to be applied for such purposes. An important feature of the FLUKA code is its potential to track several types of particles (here most of them are considered as secondaries), and also the complicated geometries which imply that the present code is a powerful tool kit for neutrino engineering applications.

Keywords: Neutrino Generator, Low Energy Neutrino, Fluka

*Email: fabbasi@sbu.ac.ir



۱. مقدمه

با توجه به مطالب پیش گفته، کد فلوکا در قواره ی یک کد شبیه ساز چند منظوره، با توانمندی تولید رویداد نوترینو، نه تنها برای کاربردهای اولیه ی خود مفید است، بلکه برای جامعه ی فیزیک و به خصوص برای طراحان آشکارسازها نیز سودمند است. بدین منظور، ما در این جا مدلی را مطالعه کرده ایم که چهره ی دیگری از کد فلوکا را به عنوان مولد رویداد نوترینو، با تأکید بر برهم کنش های پادنوترینوی الکترون در محیط پلاستیک سوسوزن در بازه ی انرژی ۱ تا ۱۰۰ MeV نشان می دهد.

در بخش بعد این نوشتار، کد فلوکا به صورت خلاصه معرفی می شود. مسأله ی مورد علاقه، مطالعه ی برهم کنش پادنوترینوی الکترون در محیط پلاستیک سوسوزن، به منظور یافتن توزیع وابسته به زاویه و انرژی برای بهره ی^(۵) ذره های خروجی قابل آشکارسازی است. بخش ۳ نتیجه های شبیه سازی های انجام شده با فلوکا برای این مسأله را ارائه می نماید. هر چند بحث ارائه شده مستقیماً به این مسأله ی خاص اشاره دارد ولی روشن است که این کد برای هر طعم در هر بازه ی انرژی و برای هر ماده ی آشکارسازی پاسخگو است. در نهایت، بخش ۴ چند نتیجه ی قابل توجه را که در خلال این کار به دست آمده است ارائه می دهد.

۲. مبانی و روش ها

در فلوکا از بسته ی پینات استفاده می شود. این بسته برهم کنش های نوترینو را در فرایندهای پراکندگی شبه کشسان^(۶)، پراکندگی ناکشسان عمقی^(۷) و پراکندگی کشسان تشدید^(۸)، شبیه سازی می کند. شبیه سازی این شیوه های برهم کنش توسط مولد رویداد کد فلوکا، در هر سه طعم نوترینو، برای جریان خنثی و جریان باردار در بازه ی وسیعی از انرژی از صفر تا TeV انجام می شود [۷-۱۰].

بنا به دلیل هایی واپاشی بتای معکوس با پروتون ها از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است [۱۱]. نخست آن که، این واکنش در انرژی های پایین به خصوص در آزمایش های نوترینوهای رآکتور، برجسته است. دیگر این که، ذره های محصول این واکنش در یک محیط فعال مثل آشکارسازهای چرنکوف یا سوسوزن که از ماده های غنی از پروتون ساخته شده اند، آشکار می شود. این واکنش چنین صورت می پذیرد:



کشف نوترینو، از یک سو پیشرفت هایی را در فیزیک نظری به ویژه در توسعه ی مدل استاندارد به وجود آورد و از طرف دیگر در پاسخ به نیازهای روزمره نقش به سزایی ایفا کرد. رآکتورهای هسته ای بهترین مولد های نوترینوی در کنترل بشر هستند. با چنین امکانی، حداقل دو آزمایش (پایش رآکتورهای هسته ای از بیرون ظرف آن و مطالعه های مربوط به نوسان نوترینو) را می توان برد که با نوترینوهای کم انرژی انجام می شود. آشکارسازی نوترینوهای کم انرژی دانش پیش تری را از برهم کنش های آن به ویژه با ناحیه ی فعال آشکارساز می طلبد. براساس خواسته های آژانس بین المللی انرژی اتمی، توسعه ی آشکارسازهای کوچک تر و مؤثرتر منجر به تعریف پروژه هایی مثل کرموراد^(۱) [۱]، پاندا^(۲) [۲] و غیره شد. در این رابطه این فرض قطعی به نظر می رسد که واپاشی بتای معکوس^(۳) علامت های مورد نظر را فراهم می کند. طراحی دقیق آشکارساز پادنوترینو به شدت به در دسترس بودن مولد رویداد نوترینوی^(۴) مطمئن وابسته است. به همین منظور برای مدل کردن خروجی برهم کنش واپاشی بتای معکوس، به توسعه ی مولد رویداد نوترینوی استاندارد نیاز داریم که داده های مورد نیاز برای طراحی آشکارساز مورد نظر را فراهم کند [۳]. در حالی که مولد های رویداد نوترینو در این انرژی های پایین، اهمیت به سزایی در کاربردهای روزانه پیدا کرده است، متأسفانه توجه کمی صرف این موضوع می شود (برای رجوع به چنین کاربردهایی واژه ی «مهندسی نوترینو» پیشنهاد می شود).

هر چند توسعه های اخیر مولد های جدید مثل ژنی (GENIE) [۳]، ژیبو (GiBUU) [۴]، نوآنس (NUANCE) [۵] و نوژن (NEUGEN) [۶] نشان می دهد که فعالیت زیادی برای بهبود این کدها در جریان است، ولی تا زمان حاضر نیاز موجود برطرف نشده است [۷]. دلیل این امر آن است که پروژه های جاری روی اندازه گیری های خاصی با بازه ی انرژی مشخص تمرکز دارد که از کاربرد فیزیکی ویژه ای ناشی شده است. بنابراین برخورداری از یک کد چند منظوره مثل فلوکا که توانایی شبیه سازی رویداد نوترینو را داشته باشد مطلوب است. تلاش های زیادی شد تا در فلوکا مدل هایی برای انرژی های پایین نیز توسعه یابد، ولی در مطالب منتشر شده، این کد به قدر کافی به عنوان مولد پادنوترینو مطالعه نشده است.



بررسی حاضر به این بازه گسترش داده شود. معمولاً مرجع‌های مرتبط، از حیث انطباق با داده‌های تجربی خالی از اشکال نیستند، که در این نوشتار سعی بر جبران این کمبود شده است. از آنجا که نشان دادن چنین کاربردهایی برای کدهایی مثل فلوکا که هدف‌های عمومی دارند، از منظر کاربری در طراحی آشکارسازها بسیار مفید است و مشخصاً می‌تواند برای توسعه‌ی طرح‌های جدید و با قابلیت‌های بیش‌تر و هم‌چنین ارزیابی عملکرد طرح‌ها مورد استفاده باشد، در ادامه، مدلی را برای مطالعه‌ی برهم‌کنش نوترینو با پلاستیک سوسوزن ارائه می‌دهیم.

۳. یافته‌ها

فلوکا به عنوان یک مولد رویداد با توانمندی شایسته و با استفاده از شبیه‌سازی برهم‌کنش‌های هسته‌ای براساس روش مونت‌کارلو عرضه شده است. کار حاضر برهم‌کنش نوترینو را در یک قطعه‌ی کوچک از ماده، بدون ورود به پیچیدگی‌های هندسی که معمولاً در آشکارسازهای واقعی نوترینو در نظر گرفته می‌شود، ولی با توجه کافی به فیزیک در برگرفته شده در برهم‌کنش، مورد مطالعه قرار می‌دهد. نسخه‌های موجود فلوکا برای بهبود زمان شبیه‌سازی، واکنش واداشته‌ی^(۱۰) نوترینو را مورد نظر قرار داده‌اند [۷، ۸]. برای هدف فعلی، برهم‌کنش‌های پادنوترینوی الکترون ($\bar{\nu}_e$) در ماده‌ی پلاستیک سوسوزن (جدول ۱) با ابعاد هندسی بسیار کوچک (مثلاً به صورت کره‌ای به شعاع ۱ cm) مطالعه شده است؛ بدین صورت که باریکه‌ای تک‌انرژی در راستای مثبت محور X در مبدأ مختصات به آن اصابت می‌نماید. علاوه بر این، خروجی‌های قابل آشکارسازی برهم‌کنش نوترینو در محیط هیدروژنی که نوترون و پوزیترون هستند، در نظر گرفته شده است. واضح است که این روش به آسانی به سایر ماده‌ها، طعم‌های نوترینو و هر ذره‌ی خروجی مورد انتظار قابل تعمیم است. تذکر این نکته خالی از لطف نیست که انتشارهای رسمی تیم فلوکا، تنها در مورد برهم‌کنش‌های پادنوترینوی میون^(۱۱) بحث می‌کند [۸]. در این جا بحث عمده به نوترینوهای کم‌انرژی (کم‌تر از حدود ۱۰۰ MeV) برمی‌گردد، ولی به انرژی‌های رآکتور (یعنی طیف زیر ۱۰ MeV)، با در نظر گرفتن ۴ MeV به عنوان انرژی شاخص، بیش‌تر توجه شده است.

در فرایندهای بالا l به طعم‌های e ، μ یا τ مربوط می‌شود. این یک واکنش شبه‌کشسان است. در خصوص واکنش شبه‌کشسان باید افزود که منظور آن است که حالت نوکلئون از پروتون به نوترون و برعکس تغییر می‌کند (این فرض که این فرایند کاملاً کشسان نیست، اشتباه است ولی با توجه به این حقیقت که هویت نوکلئون طی برهم‌کنش بدون تغییر می‌ماند، شاید این تعبیر قابل توجیه باشد [۱۲]). به دلیل فراوانی پروتون‌های آزاد، واکنش با پروتون مورد توجه است و می‌توان آشکارسازهای متنوع‌تری برای کاربردهای مختلفی مثل طیف‌نگاری نوترینوی رآکتور و آزمایش‌های مربوط به نوسان نوترینو ساخت. با این حال در ماده‌های موجود در دنیای واقعی، گزینه‌ی پروتون آزاد واقعی وجود ندارد. در عوض اکثر ماده‌های غنی از پروتون با عنصرهای دیگری مثل اکسیژن، کربن و غیره ترکیب شده است. بنابراین باید برهم‌کنش‌های دیگر نوترینو-نوکلئون، به خصوص برای طراحی آشکارساز، در نظر گرفته شود.

پیش‌رفته بودن آزمایش‌های نوترینو، کار کردن با کدهای شبیه‌سازی را طلب می‌کند، به خصوص وقتی پای طراحی آشکارساز در میان باشد. در این راستا کدهایی بیش‌تر کاربرد دارند که از عمومیت بیش‌تری برخوردار باشند [۳]. بنابراین کدهای چند منظوره‌ای مثل فلوکا با توان تولید رویداد نوترینو مناسب‌تر هستند، چون این کدها معمولاً مدل‌های رضایت‌بخشی را برای کاربردهای طراحی آشکارساز ساخته و پرداخته کرده‌اند. مسأله‌ی بسیار مهم در شبیه‌سازی پاسخ آشکارساز (سوسوزن/چرنکوف) به نوترینوهای ورودی، ارزیابی دقیق ديفرانسیل دوگانه^(۹) (یعنی؛ وابستگی انرژی-زاویه) برای بهره‌ی ذره‌های خروجی، به خصوص پوزیترون‌ها و نوترون‌ها است که برای بیش‌تر آشکارسازها حایز اهمیت است. هرچند در چنین کاربردهایی فرایند مورد نظر برهم‌کنش شناخته‌شده‌ی واپاشی بتای معکوس است، ولی از تأثیرهای مداخله‌گر اما غیر قابل اجتناب کربن‌های مجاور نباید غفلت کرد.

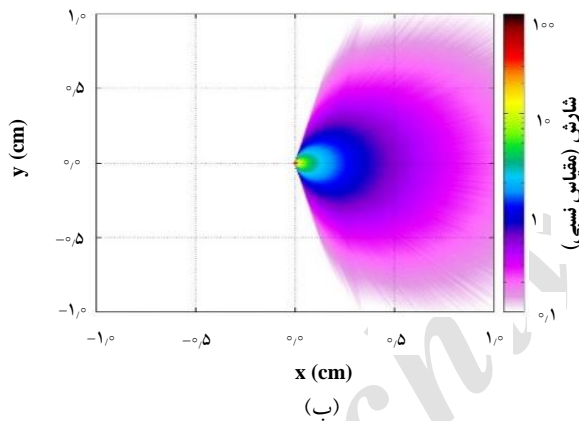
طیف مؤثر پادنوترینوی رآکتور معمولاً در بازه‌ی حدود ۱ تا ۱۰ MeV است؛ بیش‌تر نوترینوهای رآکتور زیر ۴ MeV هستند. از آنجا که بازه‌ی ۱ تا ۱۰۰ MeV برای کاربردهای دیگر مورد توجه است [۱۰]، به منظور تکمیل بحث، ترجیح داده شد که



چنان که دیده می شود، توزیع تقریباً مخروطی است، ولی انحراف فزاینده ای برای انرژی های بالاتر وجود دارد (شکل ۱ الف و ب مقایسه شود). این جنبه با توجه به توزیع زاویه ای بهره ی نوترون های خروجی برای انرژی های مختلف واضح تر نشان داده می شود (شکل ۳ الف). شکل ۲ داده های مشابهی را، بدون ارایه ی جزئیات، برای پوزیترون های خروجی نشان می دهد. به نظر می رسد یک توزیع یکنواخت در همه ی جهت ها وجود دارد. با این حال یک عدم تقارن در توزیع دیده می شود که به طور کمی با مقایسه با توزیع زاویه ای بهره ی پوزیترون تأیید می شود (شکل ۳ ب).

بیشینه مقدار در توزیع زاویه ای نوترون ها ارتباط مشخصی با انرژی نوترینوهای فرودی دارد که در شکل ۴ الف نشان داده شده است. هم چنین داده های معیار ووگل و بیکام [۱۱] ارایه شده است که توافق بسیار خوبی را نشان می دهد. در صورتی که تعریف

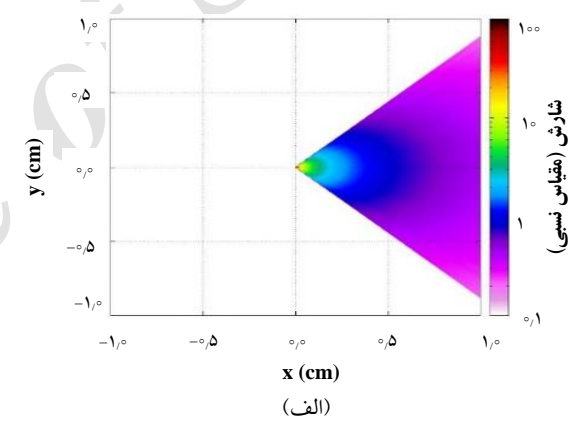
$$\theta_{\text{mean}} = \frac{\int \theta \cdot Y(\theta) d\theta}{\int Y(\theta) d\theta} \quad (2)$$



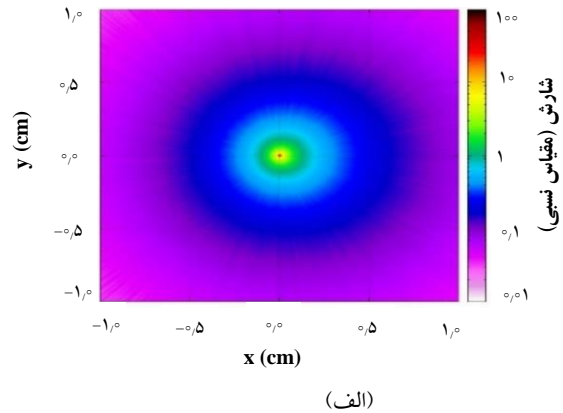
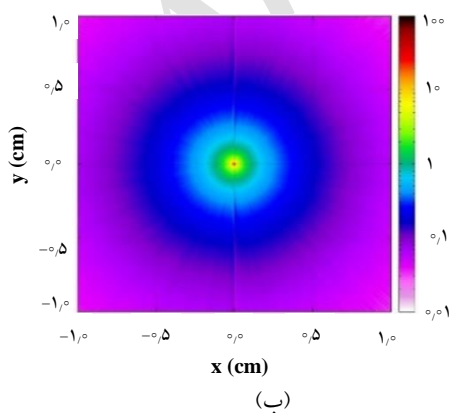
برهم کنش مورد توجه در این جا، برهم کنش شبه کشسان است که در کد توسط کارت PHYSICS تنظیم می شود. برای به دست آوردن خروجی های شارش^(۱۲) و بهره، فلوکا چند گزینه (معمولاً آشکار ساز نامیده می شود) دارد، ما آشکار سازهای زیر را به کار گرفته ایم:

- USRBIN: برای شبیه سازی توزیع فضایی ذره های خروجی؛ و
- USRYIELD: برای ارزیابی محصول ذره ها و سطح مقطع برهم کنش ها.

شکل ۱ توزیع فضایی نوترون های خروجی برهم کنش باریکه ی نوترینوی فرودی در امتداد محور X را نشان می دهد.



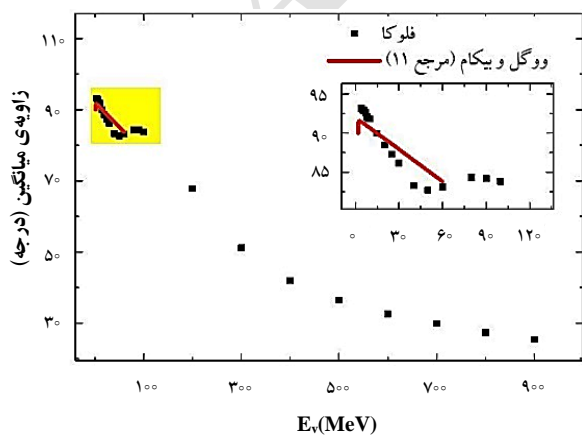
شکل ۱. توزیع فضایی نوترون های خروجی برای (الف) $E_\nu = 4 \text{ MeV}$ ، (ب) $E_\nu = 50 \text{ MeV}$.



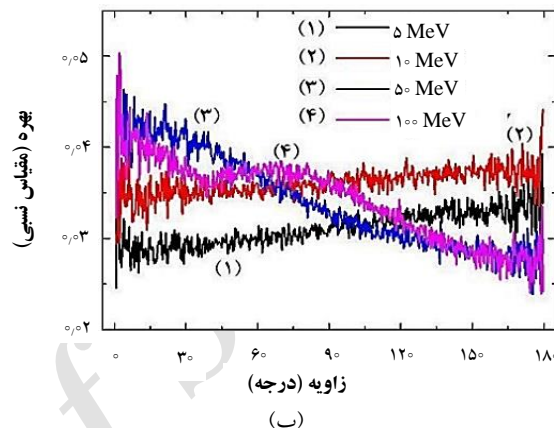
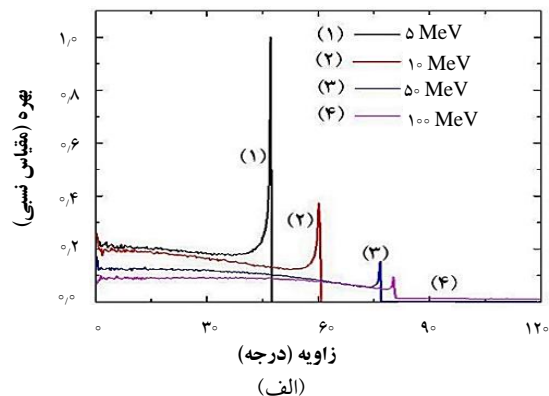
شکل ۲. توزیع فضایی پوزیترون های خروجی برای (الف) $E_\nu = 4 \text{ MeV}$ ، (ب) $E_\nu = 50 \text{ MeV}$.

را برای زاویه‌ی متوسط ذره‌های خروجی واکنش بپذیریم؛ به نحوی که در آن θ نشان‌دهنده‌ی زاویه و Y بهره‌ی خروجی واکنش است، از طریق این مقایسه می‌توان پی به میزان تطابق محاسبه‌های اخیر با داده‌های مرجع برد. زاویه‌ی متوسط نوترون‌های خروجی در شکل ۴ ب، در مقایسه با مرجع [۱۱] نشان داده شده است، انحراف آشکاری غالباً در انرژی‌های پایین وجود دارد (به کادر داخلی در شکل مذکور دقت شود). به نظر می‌رسد که عمده‌ی این انحراف به ترکیب پلاستیک سوسوزن مربوط می‌شود. زاویه‌ی میانگین پوزیترون‌های خروجی در شکل ۵ قابل دیدن است که مجدداً انحراف پیش‌گفته در آن وجود دارد. هر دو انحراف در زاویه‌ی میانگین نوترون‌ها و پوزیترون‌ها که در انرژی‌های کم، بزرگ‌تر به نظر می‌رسد، می‌تواند به اثرهای مربوط به اندازه‌ی متناهی نمونه‌ی مورد مطالعه و ترکیب آن (در این جا پلاستیک سوسوزن) نسبت داده شود.

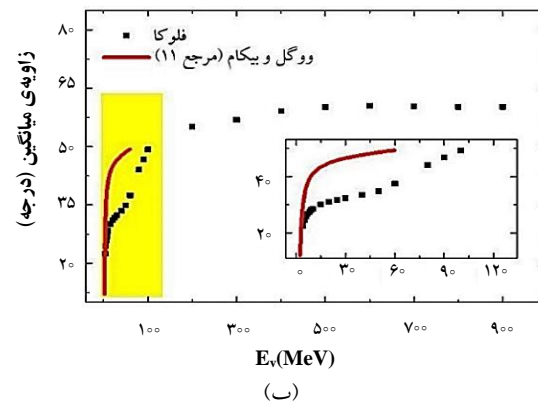
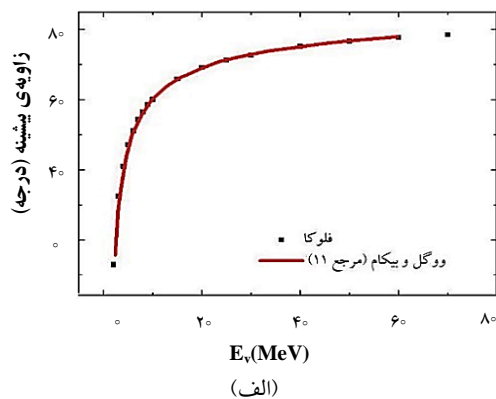
در خصوص توزیع زاویه‌ای پوزیترون‌های خروجی، مشاهده می‌شود که برای انرژی‌های کم‌تر از 20 MeV (در شکل ۳، 5 MeV و 10 MeV) توزیع اندکی به عقب (زوایای 90° تا 180° درجه) متمایل است. برعکس در مورد انرژی‌های بزرگ‌تر از این مقدار، توزیع رو به جلو متمایل می‌شود. این رفتار برای انرژی‌های کم‌تر از 20 MeV یا بیش‌تر از آن، منطبق با ملاحظه‌های ووگل و بیگام است. گو این که، شرایط خاص مربوط به یکنواختی توزیع پوزیترون‌ها در واکنش نوترینوهای حدود 20 MeV در کادر داخلی شکل ۵ نیز قابل مشاهده است و این به اجمال نشان‌دهنده‌ی درستی محاسبه‌ها است.



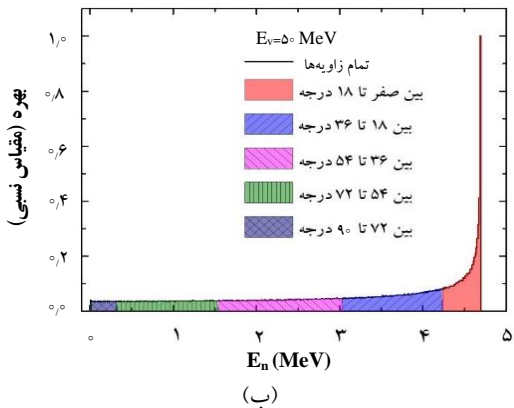
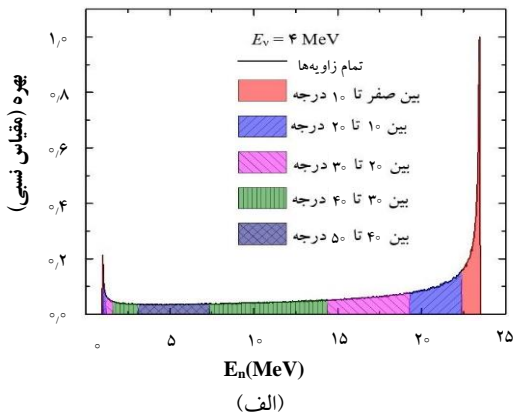
شکل ۵. توزیع زاویه‌ی میانگین پوزیترون‌های خروجی.



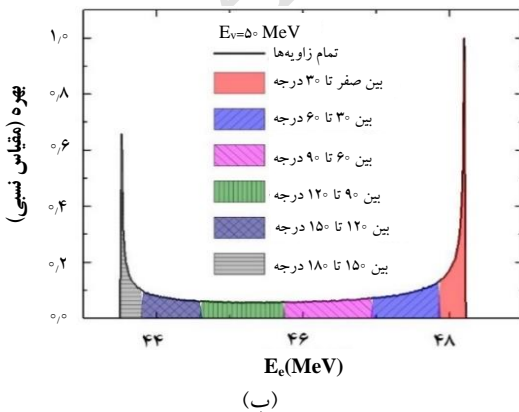
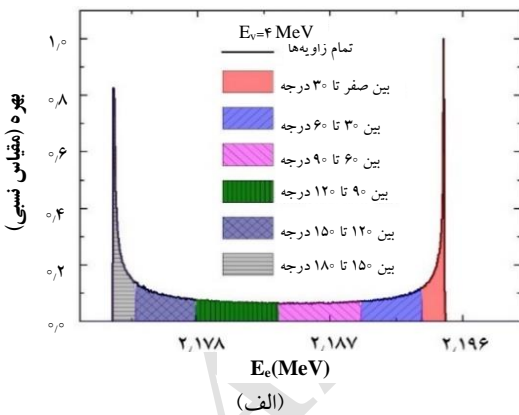
شکل ۳. توزیع زاویه‌ای بهره‌ی (الف) نوترون‌ها و (ب) پوزیترون‌های خروجی واکنش، به ازای انرژی‌های مختلف نوترینوی فرودی.



شکل ۴. توزیع زاویه‌ی (الف) بیشینه و (ب) میانگین نوترون‌های خروجی.



شکل ۶. سهم زاویه‌های مختلف در طیف نوترون خروجی (الف) $E_{\nu} = 4 \text{ MeV}$ ، (ب) $E_{\nu} = 50 \text{ MeV}$.



شکل ۷. سهم زاویه‌های مختلف در طیف پوزیترون خروجی (الف) $E_{\nu} = 4 \text{ MeV}$ ، (ب) $E_{\nu} = 50 \text{ MeV}$.

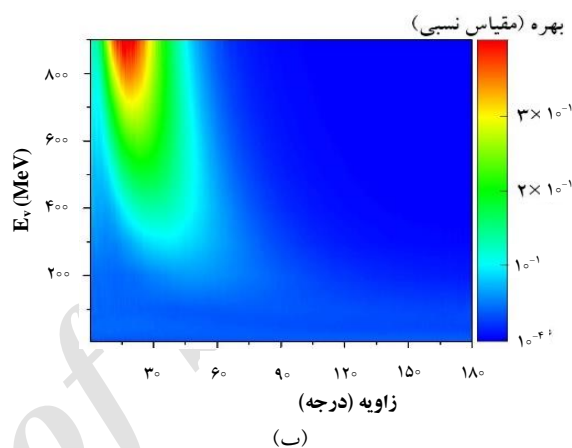
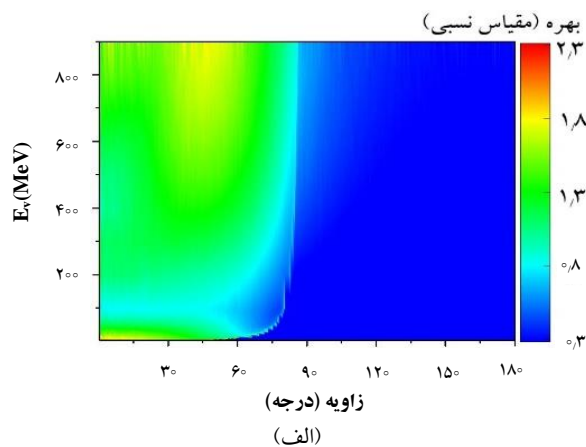
بررسی دقیق‌تر واکنش واپاشی بتای معکوس و مشخصه‌های ذره‌های خروجی آن برای هدف‌های طراحی آشکارساز نوترینو مفید است. شکل ۶ الف طیف انرژی نوترون‌های خروجی مربوط به نوترینوهای فرودی با انرژی ۴ MeV را نشان می‌دهد. در این شکل سهم نوترون‌های با توزیع زاویه‌ای مختلف در بازه‌ی صفر تا ۵۰ درجه نشان داده شده است. به طور مشابه، شکل ۶ ب نتیجه‌های مشابهی را برای نوترینوهای ۵۰ MeV با گستره‌ی زاویه‌ای متفاوت که به طور قوی با بهره‌ی دیفرانسیل دوگانه‌ی نوترون در انرژی‌های مختلف مرتبط است نشان می‌دهد. این توزیع نشان می‌دهد که تناظر تقریباً یک به یک بین گستره‌های انرژی و زاویه وجود دارد به این صورت که زاویه‌های بزرگ‌تر به انرژی‌های کم‌تر مربوط می‌شود. مشابه این نتیجه برای پوزیترون‌ها نیز درست است که در شکل ۷ سهم زاویه‌ای برای بازه‌ی صفر تا ۱۸۰ درجه نشان داده شده است.

بهره‌ی دیفرانسیلی دوگانه برای تولید نوترون‌ها و پوزیترون‌ها به عنوان تابعی از انرژی نوترینوی فرودی و زاویه‌ی خروجی برای نوترینوهای زیر ۱ GeV در شکل ۸ آمده است. در این شکل، مقدار بهنجار شده‌ی بهره‌ی تولید نوترون و پوزیترون به وسیله‌ی رنگ (توزیع کانتور) برای انرژی‌های نوترینوی فرودی (E_{ν}) در زاویه‌های مختلف (θ) نشان داده شده است. توزیع محصول نوترون با افزایش انرژی نوترینو یک رفتار مجانبی را حول ۹۰ درجه، نشان می‌دهد. این زاویه‌ی حدی حول ۹۰ درجه به وسیله‌ی ووگل و بی‌کام [۱۱] نیز مورد اشاره بوده است. در مقابل، برای پوزیترون‌ها تمایل واضحی در توزیع زاویه‌ای در بعد از ۴۰۰ MeV دیده می‌شود که به زاویه‌های کوچک (کم‌تر از حدود ۳۰ درجه) منتهی می‌شود. این تمایل، به‌رغم رفتار نسبتاً همسانگرد این توزیع در انرژی‌های کم‌تر از حدود ۲۰۰ MeV است؛ و البته این مطلب در شکل ۳ ب نیز مطرح شده بود. در هر صورت، این داده‌ها به منزله‌ی گزارش اولیه‌ای در این زمینه، لازم است در مطالعه‌های نظری و محاسباتی مورد بررسی تفصیلی قرار گیرد. هر چند، چنان‌که در بخش ۱ نیز اشاره شد، اغلب گزارش‌ها و بررسی‌های فعلی فاقد چنین داده‌هایی برای مقایسه هستند.



پی‌نوشت‌ها

1. Cormorad
2. Panda
3. Invers Beta Decay (IBD)
4. Neutrino Event Generator (NEG)
5. Yield
6. Quasi-Elastic Scattering (QES)
7. Deep Inelastic Scattering (DIS)
8. Resonance Elastic Scattering (RES)
9. Double Differential
10. Forced Reaction
11. Muon
12. Flounce



شکل ۸. توزیع دیفرانسیلی دوگانه‌ی محصول به عنوان تابعی از انرژی و زاویه برای (الف) نوترون‌ها، (ب) پوزیترون‌ها.

۴. جمع‌بندی

برهم‌کنش‌های نوترینو با توانمندی‌های موجود در کد فلوکا در بازه‌ی وسیعی از انرژی‌ها (تا TeV) قابل شبیه‌سازی است. استفاده از این کد از چند جنبه مفید است، به عنوان مثال فلوکا یک بسته‌ی چند منظوره با دیگر توانمندی‌ها برای ترابرد ذره در محیط آشکارساز است. به این ترتیب می‌توان یک مدل ترکیبی را برای آشکارسازهای پیچیده توسعه داد. براساس جنبه‌های جاسازی شده، چند نتیجه را در مورد برهم‌کنش‌های نوترینوی کم انرژی با تأکید بر نوترون‌ها و پوزیترون‌ها که برای تولید علامت‌ها در سوسوزن‌ها مهم هستند، نشان داده‌ایم. جمع‌بندی نتیجه‌ی مطالعه‌ی حاضر این است که فلوکا برای طراحی آشکارساز نوترینو مناسب است.



- [1] M. Battaglieri, R. DeVita, G. Firpo, P. Neuhold, M. Osipenko, D. Piombo, G. Ricco, M.I. Ripan, M. Taiuti, An anti-neutrino detector to monitor nuclear reactor's power and fuel composition, *Nuclear Instruments and Methods A*, 617 (2010) 209-213.
- [2] Y. Kuroda, S. Oguri, Y. Kato, R. Nakata, Y. Inoue, C. Ito, M. Minowa, A mobile antineutrino detector with plastic scintillators, *Nuclear Instruments and Methods A*, 690 (2012) 41-47.
- [3] C. Andreopoulos, A. Bell, D. Bhattacharya, F. Cavanna, J. Dobson, S. Dytman, H. Gallagher, P. Guzowski, R. Hatcher, P. Kehayias, The GENIE neutrino Monte Carlo generator, *Nuclear Instruments and Methods A*, 614 (2010) 87-104.
- [4] O. Lalakulich, K. Gallmeister, U. Mosel, Neutrino nucleus reactions within the GiBUU model, *Journal of Physics: Conference Series*, 408 (2013) 012053.
- [5] D. Casper, The nuance Neutrino Physics Simulation and the Future, *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, 112 (2002) 161-170.
- [6] H. Gallagher, The NEUGEN neutrino event generator, *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, 112 (2002) 188-194.
- [7] H. Gallagher, Neutrino event generator review, *Proceedings of Science, The 2011 Europhysics Conference on High Energy Physics-HEP (2011)* 084-088.
- [8] G. Battistoni, R.P. Sala, M. Lantz, A. Ferrari, G. Smirnov, Neutrino intractions with FLUKA, *Conf. Proc. Neutrino Intractions: From Theory to Monte Carlo Simulation, Poland, (2009)*.
- [9] G. Battistoni, A. Ferrari, M. Lantz, R.P. Sala, G. Smirnov, A neutrino-nucleon interaction generator for the FLUKA Monte Carlo code, in: Cerutti F, Ferrari A. (Eds.) *12th International Conference on Nuclear Reaction Mechanism, CERN, Varenna (Italy), Villa Monastero, (2009)*.
- [10] J.A. Formaggio, G.P. Zeller, From eV to EeV: Neutrino cross sections across energy scales, *Review of Modern Physics*, 84 (2012) 1307-1341.
- [11] P. Vogel, J. Beacom, Angular distribution of neutron inverse beta decay, $\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$, *Physical Review D*, 60 (1999) 053003-1.
- [12] G.F.J. Hernández, Some aspects of neutrino phenomenology, Instituto de Física Teórica, MSc. Thesis (2011).