



## شبیه سازی تابش چرنکوفی بتای تولیدی از یک واکنش شکافت هسته ای از یک مخزن

### آب توسط نرم افزار Geant4

نادیا، زرقي\*<sup>۱</sup>؛ محمد مهدی، فیروزآبادی<sup>۱</sup>؛ هادی، ظریف<sup>۲</sup>

۱- دانشگاه بیرجند، دانشکده علوم

۲- دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم

#### چکیده

امکان بررسی و سنجش فعالیت از فاصله دور مراکزی که در آن ها واکنش زنجیره ای شکافت صورت می گیرد همواره مورد نظر بوده است. رآکتورهای هسته ای تقریباً، در هریک گیگا وات توان، در حدود  $10^{20}$  آنتی نوترینو در ثانیه به اطراف منتشر می کنند [۷]. در این تحقیق از پوزیترون که حاصل واکنش آنتی نوترینو با پروتون مواداست، به عنوان چشمه مولد پرتو چرنکوف استفاده شده است. در رآکتور هسته ای با تعیین طیف پوزیترون در برهمکنش آنتی نوترینو با پروتون، فوتونهای چرنکوف ایجاد شده از ذره بتا محاسبه گردید. آشکار ساز چرنکوف لازم با استفاده از نرم افزار Geant4 طراحی شد. تعداد فوتونهای چرنکوف تولید شده توسط کد با تعداد فوتونهای بدست آمده از رابطه نظری در حد خطاهای موجود در سیستم همخوانی دارند.

#### واژگان کلیدی :

تابش چرنکوف، آنتی نوترینو، شبیه سازی، آشکار سازی، جیانت ۴

#### مقدمه:

در زمان فعالیت رآکتورها، آنتی نوترینوی حاصل از شکافت هسته ای رآکتور در محیط منتشر میشود و طبق معادله واپاشی بتای معکوس آنتی نوترینو به پروتونهای آب برخورد میکند و دو ذره پوزیترون و نوترون تولید می شود. تعدادی از پوزیترونها با سرعت بالاتر از سرعت نور در آب، تولید فوتونهای چرنکوف می کنند و تعدادی دیگری از این پوزیترونها با الکترونهای محیط از طریق فرایند نابودی، تولید پرتوگاما مینمایند [۱]

#### اندازه گیری فعالیت رآکتور از راه دور به روش چرنکوف آبی:

با آگاهی از نحوه تولید نور در فرایند چرنکوف، معادله [۲] (به عنوان رابطه اصلی فرایند چرنکوف)، رابطه بین زاویه فضایی نور چرنکوف و ضریب شکست نور و همچنین سرعت ذره بار دار عبوری در محیط شفاف دی الکتریک را نشان می دهد .

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$$

۱

که در آن  $\beta$  برابر با  $v/c$  و  $n$  ضریب شکست محیط است. ضریب شکست ماده تابع طول موج نور و دماست. تعداد فوتونهای چرنکوف ایجاد شده توسط ۱ پوزیترون در طول مسیر عبور از محیط دی الکتریک توسط معادله ۲ داده می شود. [۲]

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha \sin^2 \theta \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad 2$$

در این رابطه  $N$  تعداد فوتون های تولیدی،  $x$  مسافتی که ذره باردار طی کرده،  $\alpha$  الف ثابت ساختار ریز،  $\theta$  زاویه تولید  $\lambda_1$  و  $\lambda_2$  محدوده طول موج پرتو چرنکوف می باشد. حداکثر زاویه چرنکوف برای آب از رابطه ۱ مقدار ۴۱ درجه به دست می آید. پس از قرار دادن پارامترهای مساله در رابطه ۲ تعداد فوتونهای حاصل از یک پوزیترون حدود ۳۲۸ عدد به دست می آید.

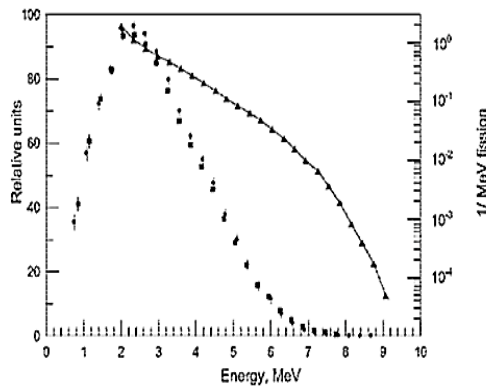
طیف انرژی آنتی نوترینوی درون یک نیروگاه هسته ای وابسته به پارامترهای آن راکتور است. انرژی متوسط آنتی نوترینوها در یک راکتور نوعی حدود ۴ مگا الکترون ولت است [۷] که به ماده برخورد میکند. سپس آنتی نوترینو با پروتون موجود در آن ماده برخورد و پوزیترون و همچنین نوترون مطابق معادله ۳ واکنش می کند،



ذرات ثانویه واکنش در این انرژی پوزیترون ها هستند. بعضی از پوزیترونها با سرعت بیشتر از سرعت نور در محیط مادی حرکت میکنند و تابش چرنکوف در محدوده قرمز تا بنفش تولید می نمایند. سپس پی ام تی ها روی ظرف آشکارساز فوتون های چرنکوف راثبت میکنند. بعضی از آنها پس از کند شدن با الکترونها واکنش داده و از طریق نابودی زوج تولید گامای با انرژی حدود  $0.511 \text{ MeV}$  میکنند که در این قسمت نیز آشکارساز سوسوزن مایع درون آشکار ساز به کمک پی ام تی ها میتوانند این گاما را آشکار سازی کنند.

مطابق شکل ۱ طیف انرژی پوزیترون در واکنش  $IBD^1$  را نزدیک یک راکتور در نظر میگیریم. [۴] این توزیع به کد  $GEANT^4$  داده شده و تابش چرنکوف ذره ثانویه (پوزیترون) شبیه سازی میشود.

<sup>1</sup> Ibd inverse beta decay



شکل ۱ طیف پوزیترون حاصل از واکنش **ibd** در راکتور [۴]

نمودار که با نقاط مربعی شکل دیده می شود طیف انرژی پوزیترون است که از معادله واپاشی بتای معکوس در راکتور ایجاد میشود و نموداری که با مثلث علامت گذاری شده، (نمودار سمت راست) نمودار طیف انرژی آنتی نوترینو است که حدود ۱/۸ مگا الکترون ولت (انرژی آستانه واکنش) نسبت به طیف پوزیترون منتقل شده است. این طیف بعد از نوشتن برنامه اصلی به کد به عنوان ورودی داده شد.

### روش انجام کار:

ظرف شمارنده، یک مکعب با ابعاد ۶ متر پر از آب، است ابعاد ظرف تنها به علت نزدیک بودن به واقعیت این اعداد در نظر گرفته شده است. اطراف آن یک حفاظ مناسب (بعلت حذف تابش زمینه) با ضخامت لازم قرار گرفته است. چشمه پوزیترون داخل ظرف شمارنده به طور یکنواخت پراکنده شده است. هنگامی که پوزیترونی با طیف انرژی مشخص ناشی از برهمکنش آنتی نوترینو با **p** (طبق معادله ۳) در محیط ایجاد شود آن را به عنوان چشمه درون ظرف در نظر گرفته و فوتونهای چرنکوف حاصل از آنرا میتوان شمارش کرد.

راکتورها به ازای هر ۱ گیگا وات توان، در حدود  $10^{20}$  آنتی نوترینو در ثانیه به اطراف منتشر می کنند. [۷] برای بدست آوردن تعداد نوترینوهای که در یک فاصله معین به یک سطح می رسند به طور تقریبی نسبت سطح مورد نظر به مساحت کره ای با شعاع برابر با فاصله مورد نظر است [۷] اگر شمارنده در فاصله ۲۵ متری از یک منبع شکافت قرار داشته باشد، تعداد آنتی نوترینو ها بر واحد سطح در حدود  $1.27 \times 10^{17}$  و در کل سطح شمارنده در حدود  $4.6 \times 10^{18}$  می باشد.

سطح مقطع برای آنتی نوترینو در واکنش معادله ۳ از مرتبه  $10^{-38} \text{ cm}^2 / \text{GeV}$  است [۸] مطابق رابطه آهنگ برهمکنش  $F = N\sigma\phi$  اگر این عدد در سطح مقطع ضرب شود عدد بسیار کوچکی بدست می آید. یعنی



آهنگ تولید پوزیترون نیز کم خواهد بود. حجم ظرف آشکارساز ۲۱۶ متر مکعب است یعنی تعداد ملکولهای آب در این ظرف برابر با  $7224 \times 10^{25}$  عدد خواهد بود. همانطور که مشاهده میگردد در واکنش واپاشی بتای معکوس تعداد پوزیترونها حاصله نیز بسیار اندک است.

با در دست داشتن تعداد و انرژی این فوتون ها میتوان فهمید هر پوزیترون چند فوتون میدهد و درحقیقت پوزیترون اولیه که از واکنش مینا ایجاد شده است اطلاعاتی را درباره انتی نوترینوی حاصل از فعالیت راکتور به ما میدهد.

### اجرای برنامه

این برنامه همانطور که قبلا اشاره شد شامل یک چشمه پوزیترون در یک ظرف مکعبی به ابعاد ۶ متر است (به دلیل نزدیک بودن به واقعیت) که یک محافظ سربی اطراف این ظرف قرار گرفته است در دو سطح طرف آشکار سازی ام تی قرار گرفته است و فوتونها را آشکار می کنند در این قسمت فرآیندهای آن بررسی شده و نتایج زیر گرفته شده است.

لازم به ذکر است در این تحقیق منظور از اجرای اصلی این است که فوتونهای حاصل از فرآیند چرنکوف، ذره مادر برای بررسی انتی نوترینوی واکنش در نظر گرفته میشود و اجزای بعدی در اصل تغییر دادن پارامترهاست که با این متغیرها میتوان طیف انرژی فوتونهای نوری حاصل از فرآیندهای چرنکوف را بررسی کرد.

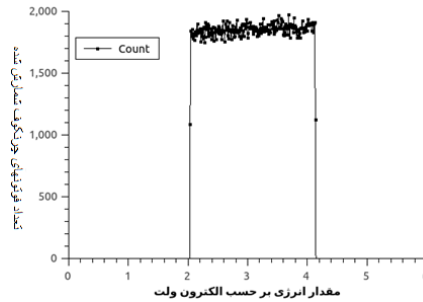
همچنین نمودارها در اجرای ۱۰۰۰ رویداد (۱۰۰۰ پوزیترون در ظرف آشکارساز شلیک میشوند) دقیقتر و علمی تر بررسی میگردند زیرا همانطور که ملاحظه میشود در اجرای ۱۰۰۰ رویداد خطای تصادفی کمتر بوده و نتایج دقیقترند به همین علت بقیه نمودارها با اجرای ۱۰۰۰ رویداد مقایسه میشوند. برنامه برای ۱۰۰۰ رویداد اجرا میشود و تعداد به دست آمده تقسیم بر ۱۰۰۰ میگردد تا تعداد فوتونهای چرنکوف حاصل از ۱ پوزیترون به دست آید. نتایج با بررسی پارامترهای زیر گرفته شده است.

الف) شکل چشمه کروی باشد. ب) اگر فوتونهای چرنکوف تمام ذرات یعنی پوزیترون اولیه و ذرات ثانویه را در نظر بگیریم ج) تغییر ابعاد ظرف آشکارساز د) تغییر ماده درون آشکارساز ه) اگر پی ام تی روی هر سه وجه آشکار سازی قرار داشته باشد. (در این آزمایش پی ام تی ها روی دو وجه مقابل قرار گرفته اند).

بحث و نتیجه گیری:



پس از اجرا کردن برنامه، خروجیها تعداد فوتونهای چرنکوف حاصل از ۱۰۰۰ پوزیترون را نشان میدهد، نمودار این اعداد در نرم افزار **qi plot** رسم شده و اعداد آن بررسی می شود. نمودارهای متفاوتی با اجرای برنامه و تغییر پارامترها توسط نرم افزار رسم شد که در اینجا نمودار اجرای اصلی برنامه در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲ نمودار تعداد فوتونهای چرنکوف بر حسب انرژی حاصل از ۱۰۰۰ رویداد در این نمودار مشخص است که:

۱- محدوده انرژی این فوتونهای چرنکوفی از ۲ تا ۴ الکترون ولت است طول موجهای محدوده طیف آبی و بنفش که بیشتر مخصوص فوتونهای چرنکوفی است [۲] وقتی در رابطه ۳ قرار میگیرند انرژی آنها بین ۲ تا ۴ الکترون ولت بدست می آید.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad ۳$$

۲- محور عمودی تعداد این فوتونها را مشخص میکند که با تغییر این پارامترها اعداد روی محور عمودی تغییر می کند.

۳- بیشتر انرژی فوتونها در محدوده بنفش و آبی طیف مرئی هستند.

با تغییر پارامترها برای اجرای ۱۰۰۰ رویداد یعنی وقتی ۱۰۰۰ پوزیترون در ظرف آشکارساز وجود دارند نتایج به صورت زیر بدست آمد.

الف) برای چشمه کروی به قطر ۵۰ سانتیمتر و چشمه پراکنده در ظرف آشکارساز نتیجه میشود که فوتون های چرنکوف از چشمه کروی زیادتر از فوتونهای حاصله از چشمه پراکنده در مکعب است. بدین دلیل که در چشمه پراکنده ممکن است پوزیترون در لبه آشکارساز باشد و با آب واکنش ندهد که فوتون چرنکوف تولید کند اما در چشمه کروی با شعاع ۵۰ سانتیمتر نسبت به ظرف آشکارساز ۶ متری که بزرگ است یک پوزیترون کاملاً فرصت دارد که با آب واکنش داده و پی ام تی فوتون حاصل از آنرا شمارش کند .





ب) اگر فوتونهای چرنکوف حاصل از تمام ذرات را در نظر بگیریم این تعداد قطعاً باید افزایش یابد که طبق اجرا تعداد فوتونها هم زیاد میشود.

ج) تغییر ابعاد ظرف ۵ برابر و ۱۰ برابر شده است و مشاهده شد فوتونهای نوری بیشتری تولید شده اند.

د) در مرحله بعدی نیز ماده درون آشکارساز از آب به ماده ۹۹ درصد آب و ۱ درصد گادولینیوم تغییر پیدا کرد و در مرحله بعدی نیز درصد گادولینیوم افزایش یافت که تغییر قابل توجهی در نتیجه بدست نیامد. زیرا این ماده در فرآیند سوسوزنی نقش دارد و در این تحقیق فوتونهای چرنکوفی شمارش شد.

ه) در مرحله بعدی روی هر شش وجه ظرف آشکارساز پی ام تی قرار داده شد و مشاهده شد تعداد فوتونهای ثبت شده از فرآیند چرنکوف بیشتر شد.

فهرست منابع:

- [۱] D. Griffiths ,” Introduction to elementary particles”( ۱۹۸۷)  
 [۲] R. c.Fernow,” Introduction to experimental particle physics”(۱۹۸۶) chapter ۸  
 [۳] N. Tsoufanidis “Measurment and detection of radiation” Second Edition (۱۹۹۵)  
 [۴] V. V. Sinev,” Nuclear reactor fissile isotopes antineutrino spectra “institute for Nuclear Research RAS, Moscow (۳۰july۲۰۱۳)  
 [۵] John r.Lamarsh introduction to nuclear engineering ۳ed edition  
 [۶] Weston m Stacey nuclear reactor physics ۲ed edition  
 [۷] Th. A. Mueller,<sup>۱</sup> D. Lhuillier,<sup>۱</sup> \_ M. Fallot,<sup>۲</sup> A. Letourneau,<sup>۱</sup> S. Cormon,<sup>۲</sup> M. Fechner,<sup>۳</sup>Improved Predictions of Reactor Antineutrino Spectra (Dated: March ۱۴, ۲۰۱۱)  
 [۸] Yu Seon Jeong and Mary Hall Reno,Tau neutrino and antineutrino cross sections july ۱۲ ,۲۰۱۰