

مجله فیزیک کاربردی دانشگاه الزهرا (س)

شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۲

## بررسی پارامترهای بهینه در شبیه‌سازی تولید اشعه ایکس ترمزی حاصل از الکترون‌های تولید شده لیزری به عنوان چشمه‌های فوتون‌ترونی

سعیده نجفی<sup>۱</sup>

لیدا نیک‌زاد<sup>۲</sup>

زعفر ریاضی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۳/۹

تاریخ تصویب: ۹۲/۴/۱۳

### چکیده

در این مقاله با استفاده از طیف‌های الکترونی حاصل از برهم کنش لیزر-پلازما تولید اشعه ایکس تابش‌ترمزی در هدف‌های مختلف با استفاده از کد MCNPX شبیه‌سازی می‌شود. هدف از این کار به دست آوردن جنس و ضخامت بهینه جهت بازدهی بالای تولید اشعه ایکس، یافتن زاویه بهینه گسیل اشعه ایکس از هدف و به دست

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک دانشگاه آزاد اسلامی، تهران مرکز؛ saeidehnajafi66@yahoo.com

<sup>۲</sup> پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده اپتیک و لیزر

<sup>۳</sup> پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

آوردن طیف الکترونی بهینه جهت تولید اشعه ایکس با شار مناسب جهت کاربردهای پزشکی و تولید نوترون است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش انرژی بیشینه الکترون، ضخامت بهینه بازدهی خروجی را افزایش می‌دهد. همچنین برای مواد با چگالی بیشتر، افزایش گسیل فوتون‌های ترمزی در ضخامت‌های کمتر روی می‌دهد و شار بیشتری از نوترون مشاهده می‌شود.

## واژه‌های کلیدی: شتاب‌دهنده لیزری، طیف‌های الکترون،

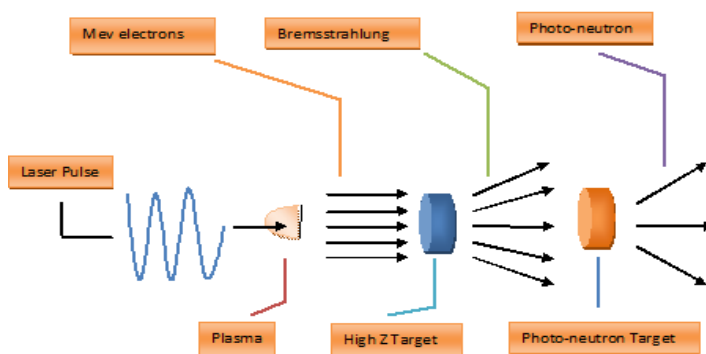
فوتون ترمزی، تولید نوترون

### ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر از برخورد پالس لیزرهای توان بالا با پلاسما برای یافتن شتاب ذرات از جمله الکترون‌ها استفاده شده است. از برخورد الکترون‌های پر انرژی با هدف جامد با  $Z$  بالا می‌توان برای تهیه منابعی از ذرات مانند پروتون، پوزیترون، فوتون‌های با انرژی در حد مگا الکترون ولت استفاده نمود [1]. شتاب‌دهنده‌های ذرات کاربردهای بسیار گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف از جمله علوم پزشکی، بیولوژی، مواد و فیزیک پرانرژی دارند. در شتاب‌دهنده‌های متداول، میدان‌های شتاب‌دهنده محدود به چند  $\text{MeVm}^{-1}$  هستند. بنابراین، تولید طیف‌های الکترونی پرانرژی معمولاً نیازمند شتاب‌دهنده‌های بزرگ و گران‌قیمت است [2]. شتاب‌دهنده‌های لیزر-پلاسمایی به عنوان نسل جدید شتاب‌دهنده‌های کم‌حجم مطرح شده‌اند و این امر به دلیل قابلیت تحمّل میدان‌های الکتریکی بسیار بزرگ توسط آنهاست (بزرگتر از  $100 \text{ GeVm}^{-1}$ ) [3]. در بیشتر کاربردها، به طیف‌های الکترونی با کیفیت بالا و توزیع تک انرژی نیاز است. طیفی که فاقد این شرایط باشد به سختی قابل استفاده می‌باشد، زیرا انتقال و یا کانونی کردن آن دشوار خواهد بود. به تازگی سه گروه تحقیقاتی از کالج سلطنتی لندن، لابراتوار ملی برکلی لارنس (LBNL) و LOA، به طور مستقل به تولید طیف‌های شبه تک انرژی الکترون با

انرژی بالا پرداخته‌اند. آن‌ها این کار را مستقیماً با کانونی کردن یک پالس لیزر بر روی یک پلاسمای همگن، یا بر روی یک کانال پلازما انجام داده‌اند [4,5,6].

هنگامی که الکترون‌های پر انرژی بر روی هدف جامد با  $Z$  بالا برخورد می‌کنند، فوتون‌های ایکس شامل طیف گسسته مشخصه (انرژی در حد keV) و پیوسته تابش ترمزی تولید می‌شوند. در این کار، مطالعه ما بر روی تابش ترمزی با انرژی بالا متمرکز است. نشان داده می‌شود که شدت تابش ترمزی به طور محسوسی به طیف الکترون، جنس و ضخامت هدف و زاویه پراکندگی بستگی دارد [7]. در اثر واکنش هسته ای این فوتون‌های تابش ترمزی با هسته‌های ماده هدف ثانویه واکنش نشان داده در اثر واکنش فوتوهسته‌ای تابش هسته‌ای تولید می‌کنند. در شکل ۱ تولید فوتونوترون از برخورد طیف ترمزی حاصل از الکترون‌های لیزری به صورت شماتیک نشان داده شده است. در طی این فرآیند، فوتون جذب هسته هدف شده به عنوان یک تعامل فوتو-نوکلئونی منجر به تولید نوکلئون می‌شود [8]. مکانیسم فیزیکی آن را می‌توان این گونه شرح داد که وقتی فوتون فرودی به هدف جامد برخورد می‌کند، انرژی فوتون به هسته منتقل شده باعث تحریک هسته می‌شود و آن را به یک حالت گسسته با انرژی بالاتر می‌برد و منجر به تغییر انرژی نوترون مرز و پروتون داخل هسته شده و انرژی اضافی به فرم نوترون ساطع می‌شود. این واکنش یک واکنش آستانه ای ست زیرا انرژی فوتون می باید حداقل برابر انرژی پیوندی یک نوکلئون باشد و چون انرژی پیوندی نوکلئون به نوع هسته بستگی دارد، بنابراین انرژی آستانه معمولاً بالاست. احتمالی وقوع اثر واپاشی در انرژی‌های بالای  $10 \text{ MeV}$  بیشتر است. در واکنش‌های فوتو-نوکلئون انتشار نوترون محتمل تر از پروتون می‌باشد.



شکل ۱: شمایی از تولید فوتونوترون از طیف ترمزی حاصل از الکترون‌های لیزری

## ۲. روش کار

در این کار برای شبیه‌سازی تولید تابش ترمزی، از طیف‌های تجربی شبه تک انرژی الکترون که از برهم کنش لیزر- پلاسما تولید می‌شوند استفاده شده است. برای تولید چشمه‌های فوتونوترنی، طیف‌های شبه تکفام الکترونی با انرژی بالای 10MeV انتخاب شده‌اند. هدف‌ها هم به شکل استوانه توپر هستند. در جدول ۱ مشخصات لیزر و پلاسمای مولد طیف‌های الکترونی و شعاع هدف برای تولید تابش ترمزی آمده است. شعاع هدف‌ها متناسب با ابعاد چشمه الکترونی انتخاب شده است.

جدول ۱: مشخصات لیزر و پلاسمای مولد طیف‌های الکترونی و شعاع هدف

قدرت لیزر (TW)	چگالی پلاسما ( $cm^{-3}$ )	انرژی قله (MeV)	شعاع هدف (mm)
۱۰	$1 \times 10^{19}$	۱۱	۸
۱۶,۶	$14 \times 10^{19}$	۴۰	۰,۰۱۸
۵۰	$2 \times 10^{19}$	۵۵	۰,۰۴
۲۰	$6 \times 10^{18}$	۱۷۵	۰,۰۷۲

برای شبیه‌سازی با کد MCNPX که برای نمونه‌برداری فوتون‌های تابش ترمزی تقریب بورن را به کار برده است [9]، ابتدا مشخصات چشمه و هدف به عنوان ورودی به

کد داده شده بعد از اجرا، خروجی به صورت تعداد کل فوتون‌های تولید شده حاصل می‌شود. داده‌های طیف‌های تجربی چشمه الکترونی را به کمک نرم‌افزار digxy استخراج کرده به کد معرفی می‌کنیم. هدف‌های بررسی شده در این تحقیق شامل استوانه‌های حجمی از جنس سرب ( $z=82, \rho=11.34\text{g/cm}^3$ )، تنگستن ( $z=74, \rho=19.3\text{g/cm}^3$ ) و تانتالیم ( $z=73, \rho=16.6\text{g/cm}^3$ ) هستند. ضخامت هدف (همان ارتفاع استوانه)، از ۱۰۰ میکرون تا ۳۰۰۰ میکرون در نظر گرفته سپس ضخامت بهینه برای هر طیف و هر ماده را تعیین می‌کنیم. پس از به دست آوردن ضخامت و جنس بهینه برای هدف، توزیع یزاویه ای پراکندگی طیف ترمزی، و در نهایت تولید نوترون از فوتون‌های ترمزی شبیه‌سازی می‌شوند.

### ۳. بحث و نتایج

#### ۳-۱. یافتن طیف ترمزی بهینه

برای مقایسه طیف‌ها و یافتن بهترین ضخامت‌ها از پارامتری به نام کسری موثر استفاده می‌کنیم. این پارامتر چنین تعریف می‌شود:

$$\text{کسر موثر} = \frac{\text{تعداد فوتونها با انرژی بیش از } E}{\text{تعداد کل فوتونها}} \quad (1)$$

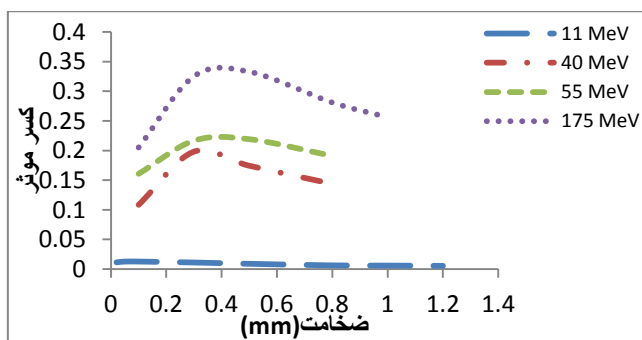
که انرژی  $E$ ، حداقل انرژی لازم فوتون‌ها برای شرکت در فرایند فوتونوترونی می‌باشد. مقادیر  $E$  برای انجام فرایند فوتونوترونی برای هدف‌های تنگستن، سرب و تانتالیم در جدول ۲ آمده‌اند:

جدول ۲: مقادیر  $E$  برای انجام فرایند فوتونوترونی با هدف‌های تنگستن، سرب و تانتالیم

ایزوتوپ	کمترین انرژی $E$ (MeV)	فراوانی (%)
Pb-208	7.37	52.40
Ta-181	7.58	99.99
W-184	7.41	30.70

۲۶ / بررسی پارامترهای بهینه در شبیه‌سازی تولید اشعه ایکس ترمزی حاصل از الکترون‌های ...

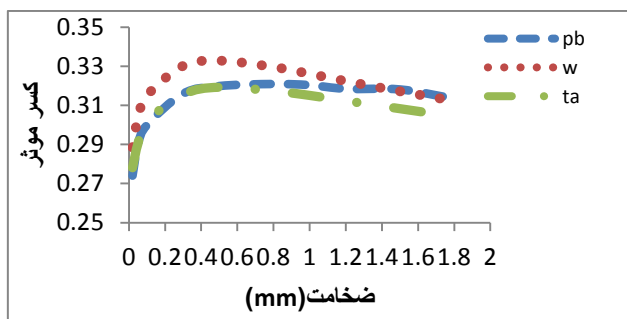
در شکل ۲ نمودار کسر موثر با استفاده از چهار طیف الکترونی مذکور، برای ضخامت‌های مختلف تنگستن رسم شده است.



شکل ۲: نمودار کسر موثر برای ضخامت‌های مختلف تنگستن با استفاده از طیف‌های الکترونی

همان‌طور که مشاهده می‌شود برای طیفی الکترونی با انرژی قله بیشتر، کسر موثر بیشتری به دست می‌آید، یعنی با استفاده از الکترون‌های پر انرژی‌تر، تعداد فوتون‌های بیشتری با قابلیت تولید فوتون‌ترون تولید می‌شود.

برای بررسی تاثیر جنس هدف در تولید تابش ترمزی، سه ماده سرب، تنگستن و تانتالیم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مقادیر کسر موثر بر حسب ضخامت را با به کارگیری طیف الکترونی 175 MeV، نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشاهده می‌شود از میان این سه ماده، استفاده از تنگستن با چگالی بزرگتر، فوتون‌های با کسر موثر بیشتری تولید می‌کند.



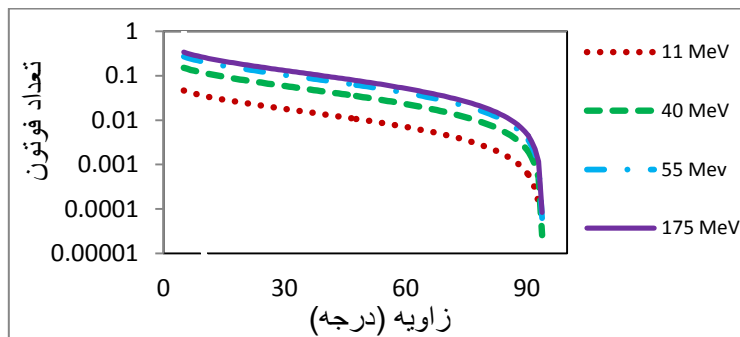
شکل ۳: نمودار کسر موثر برای ضخامت‌های مختلف هدف‌های سرب، تنگستن، تانتالیم.

### ۲-۳. بررسی توزیع زاویه‌ای تابش ترمزی

بر طبق رابطه زیر برای زاویه انتشار تابش ترمزی، برای الکترون‌های با انرژی‌های کمتر، توزیع زاویه‌ای فوتون ترمزی در جهت عمود بر پرتو فرودی ماکزیمم است. هرچقدر که انرژی الکترون افزایش یابد، ماکزیمم توزیع زاویه‌ای در راستای پرتو فرودی قرار می‌گیرد:

$$\theta_{\text{photon}} \approx m_e c^2 / E_e \quad (2)$$

که  $m_e$  جرم الکترون،  $E_e$  انرژی الکترون، و  $c$  سرعت نور و  $\theta$  زاویه گسیل فوتون نسبت به راستای فرود باریکه الکترونی می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی تعداد فوتون‌های حاصله بر حسب زاویه  $\theta$ ، برای چهار طیف الکترونی، با استفاده از کد MCNPX در شکل ۵ ارائه شده‌اند.



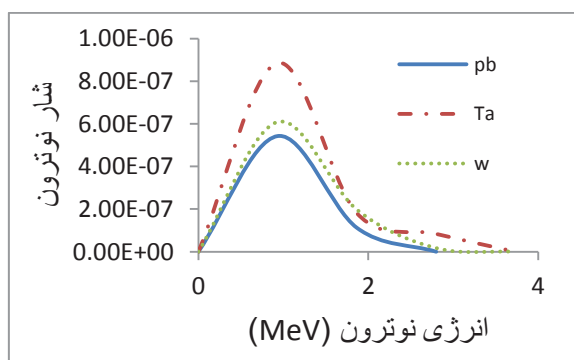
شکل ۴: توزیع زاویه‌ای تابش ترمزی برای طیف‌های مختلف الکترونی و هدف تنگستن

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین تولید فوتون تابش ترمزی در حوالی راستای فرود باریکه الکترون یعنی  $\theta=0$  است و هرچقدر انرژی الکترون فرودی بیشتر شود، پراکندگی کمتری مشاهده می‌شود و فوتون‌ها متمرکزتر شده در راستای الکترون فرودی قرار می‌گیرند.

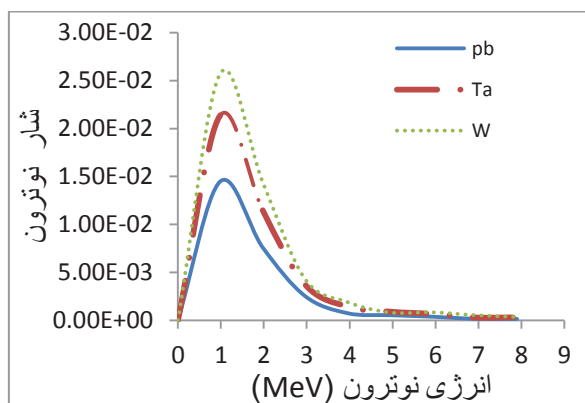
### ۳-۳. تولید فوتونوترون

در این مرحله به بررسی تولید نوترون از فوتون‌های ترمزی می‌پردازیم. بر طبق شکل ۱، ابتدا در تولید تابش ترمزی از هدف اولیه با جنس بهینه تنگستن، و چهار طیف الکترونی که

در این پروژه داریم، استفاده می‌کنیم. سپس برای تولید نوترون، فوتون‌های حاصل را به هدف ثانویه از جنس‌های مختلف برخورد می‌دهیم. هدف دوم را نیز استوانه‌ای توپر با همان شعاع انتخاب شده در جدول ۱ برای هدف اول در نظر می‌گیریم. هدف دوم را درست در مقابل هدف اول قرار دادیم و در فاصله ۰٫۳ میلی‌متر به آن قرار می‌دهیم. نتایج شبیه‌سازی تولید نوترون به صورت نمودار شار نوترون بر حسب انرژی آن، با استفاده از هدف‌های دوم از جنس سرب، تانتالیم و تنگستن با ضخامت ۲ میلی‌متر در شکل‌های زیر نشان داده شده‌اند.

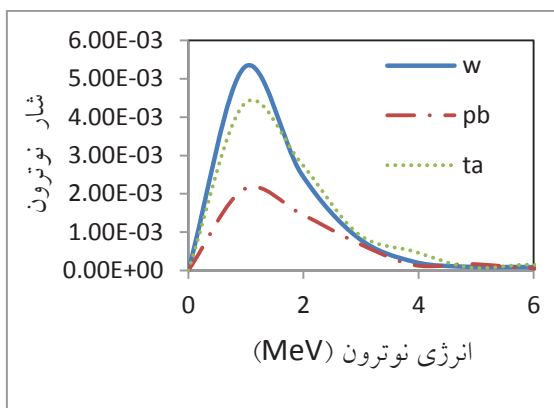


شکل ۵: نتایج شبیه‌سازی تولید نوترون برای هدف دوم از جنس سرب و تانتالیم و تنگستن در ضخامت ۲ میلی‌متر و انرژی الکترون فرودی ۱۱ MeV

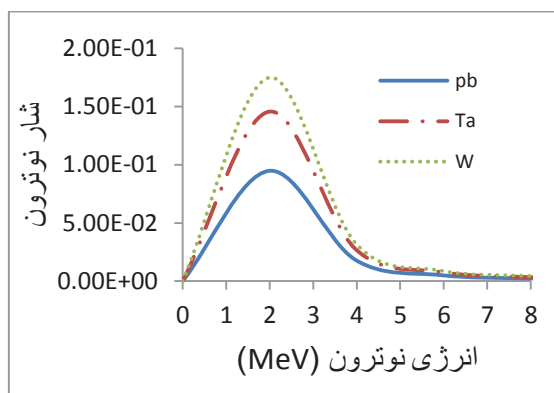


شکل ۶: نتایج شبیه‌سازی تولید نوترون برای هدف دوم از جنس سرب و تانتالیم و تنگستن در ضخامت ۲ میلی‌متر و انرژی الکترون فرودی ۵۵ MeV





شکل ۷: نتایج شبیه‌سازی تولید نوترون برای هدف دوم از جنس سرب و تانتالیم و تنگستن در ضخامت و انرژی الکترون فرودی  $40\text{ MeV}$  و  $2$  میلی‌متر و انرژی الکترون فرودی



شکل ۸: نتایج شبیه‌سازی تولید نوترون برای هدف دوم از جنس سرب و تانتالیم و تنگستن در ضخامت  $2$  میلی‌متر و انرژی الکترون فرودی  $175\text{ MeV}$

مقایسه چهار طیف الکترونی برای تولید نوترون وقتی که هدف دوم، یعنی تنگستن با ضخامت  $2$  میلی‌متر، نشان می‌دهد که هر چقدر انرژی طیف ورودی الکترون بیشتر باشد طیف نوترونی تولید شده نیز شار بیشتری خواهد داشت.

#### ۴. نتیجه‌گیری

با توجه به نقش اشعه ایکس در درمان تومورها و همچنین نیاز به چشمه‌های فوتون‌ترونی جهت کاربردهای پزشکی و صنعتی، تولید یک چشمه اشعه ایکس کم‌حجم و کم‌هزینه دارای اهمیت است. در این مقاله، نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده به وسیله کد MCNPX برای تولید فوتون‌های تابش ترمزی از برهمکنش الکترون‌های لیزری با سه جنس مختلف هدف ارائه شده‌اند. علاوه بر تاثیر نحوه توزیع انرژی الکترون‌های شبه تکفام، اثر ابعاد هدف و جنس هدف بر روی نتایج حاصل نیز بررسی شده‌اند. همچنین، توزیع زاویه‌ای پراکندگی فوتون‌های تولید شده در تابش ترمزی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که طیف الکترونی با انرژی قله بیشتر، فوتون‌ها و فوتون‌ترونی‌های بیشتری تولید می‌کند. به کارگیری هدف با چگالی بالاتر به منظور تولید فوتون‌ها و فوتون‌ترونی‌های بیشتر، مناسب‌تر است. بیشترین فوتون تابش ترمزی نیز در راستای فرود باریکه الکترون است و هر چه انرژی الکترون فرودی بیشتر شود پراکندگی کمتری مشاهده می‌شود و فوتون‌ها در راستای الکترون فرودی یعنی  $\Theta=0$  قرار می‌گیرند.

#### ۵. منابع

- [1] C. Courtois, R. Edwards, A. Compant La Fontaine, C. Aedy, S. Bazzoli et al; *Phys. Plasmas* **20** (2013) 083114.
- [2] T. Tajima and J. M. Dawson; "Laser electron accelerator"; *Phys. Rev. Lett.* **43** (1979) 267–270.
- [3] A. Modena, Z. Najmudin, A. E. Dangor, C. E. Clayton, K. A. Marsh, C. Joshi, V. Malka, C. B. Darrow, C. Danson, D. Neely and F. N. Walsh; "Electron acceleration from the breaking of relativistic plasma waves"; *Nature* **337** (1995) 606–608.
- [4] J. Faure, Y. Glinec, A. Pukhov, S. Kiselev, S. Gordienko, E. Lefebvre, J. P. Rousseau, F. Burgy, and V. Malka; "A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams"; *Nature* **431** (2004) 541.
- [5] A. Pukhov and J. Meyer-ter-Vehn; "Laser wake field acceleration: the highly nonlinear broken-wave regime"; *Appl. Phys. B* **74** (2002) 355.

- [6] F. S. Tsung, et al.; “Near GeV energy laser wakefield acceleration of self-injected electrons in a cm scale plasma channel”; *Phys. Rev. Lett.* **93**, No. 18 (2004) 1383.
- [7] Xu Hai-Bo, Peng Xian-Ke, and Chen Chao-Bin; *Chinese Phys. B* **19** (2010) 062901
- [8] G. Kim et al; “Measurement of Photoneutron Spectrum at Pohang Neutron Facility”; *Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. A* **485** (2002) 458.
- [9] M. J. Berger and S. M. Seltzertiona; Bureau of Standards, Washington D. C., 20284 (1970).